



ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta stavební

Katedra hydrauliky a hydrologie

**Analýza rozdělení frakcí v transportované bimodální směsi
v laboratorním žlabu**

**Analysis of segregation in bimodal mixture transported in
laboratory flume**

Diplomová práce

Studijní program: Stavební inženýrství

Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

Vedoucí práce: prof. Dr. Ing. Václav Matoušek

Bc. Jan Hlom

Praha 2017



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: Hlom Jméno: Jan Osobní číslo: 410760
Zadávací katedra: K141 - Katedra hydrauliky a hydrologie
Studijní program: Stavební inženýrství
Studijní obor: Vodní hospodářství a vodní stavby

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce: Analýza rozdělení frakcí v transportované bimodální směsi v laboratorním žlabu

Název diplomové práce anglicky: Analysis of segregation in bimodal mixture transported in laboratory flume

Pokyny pro vypracování:

Určování poměru transportovaného množství jednotlivých frakcí v proudění dvousložkové směsi v laboratorním žlabu. Využití videozáznamů k určování aktuálního a průměrného poměru frakcí v transportované směsi. Analýza vlivu volby mezních hodnot na výsledný transportovaný poměr. Porovnání výsledků analýzy videozáznamu s rozbořením odebraného vzorku za využití znalostí kvantitativních vlastností proudění a měřeného rychlostního rozdělení. Určení možné chyby jednotlivých metod. Zjištění vlivu vytržení směsi na maximální koncentraci v sedimentu vzhledem k používanému materiálu.

Seznam doporučené literatury:

Zrostlík, Š. and Matoušek, V. (2017). Kinetic theory based approach to modelling of segregation in intense bimodal bed load transport. Proc. 18th Int. Conf. on Transport & Sedimentation of Solid Particles, Prague, Czech Republic, pp. 409-417 (ISBN 978-83-7717-269-8).

Jméno vedoucího diplomové práce: prof. Dr. Ing. Václav Matoušek

Datum zadání diplomové práce: 2.10.2017 Termín odevzdání diplomové práce: 7.1.2018
Údaj uveďte v souladu s datem v časovém plánu příslušného ak. roku

Podpis vedoucího práce

Podpis vedoucího katedry

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Beru na vědomí, že jsem povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je nutné uvést v diplomové práci a při citování postupovat v souladu s metodickou příručkou ČVUT „Jak psát vysokoškolské závěrečné práce“ a metodickým pokynem ČVUT „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta(ky)

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s metodickým pokynem ČVUT 1/2009 „O dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací“.

.....
Místo zpracování, datum

.....
Bc. Jan Hlom

Poděkování

Chtěl bych tímto poděkovat vedoucímu diplomové práce prof. Dr. Ing. Václavu Matouškovi za odborné vedení, rady a vřelý přístup. Další poděkování patří Ing. Štěpánu Zrostlíkovi za jeho čas, rady a hodnotné konzultace. Nakonec bych také rád poděkoval za podporu rodině.

Tato práce vznikla za podpory projektu GAČR č. 16-21421S a studentského grantového projektu SGS č. SGS17/065/OHK1/1T/11.

ABSTRAKT

Předkládaná práce se zabývá určováním okamžitého a průměrného poměru transportovaného množství jednotlivých frakcí v proudu dvousložkové směsi v laboratorním žlabu. V práci je popsán recirkulační sklopný žlab, typický průběh pokusu a jeho vyhodnocení a vlastní transport dvousložkové směsi sedimentu. Dále je provedena citlivostní analýza vyhodnocování videozáznamu pořizovaného během experimentů. Výsledky poměru frakcí zjištěné metodou analýzy videozáznamu jsou porovnány s výsledkem vzorku odebíraného během experimentu a jsou určeny možné chyby obou metod. Dále se práce zabývá pórovitostí sedliny dvousložkových směsí. Výsledky vlastních měření frakcí kulových a nekulových částic jsou porovnány s předpovědí různých vhodných modelů.

Klíčová slova: Transport sedimentu, dvousložková směs, analýza videozáznamu, pórovitost.

ABSTRACT

This study deals with the determination of temporary and time-averaged proportions of individual fractions in bimodal mixture flowing in a tilting flume. The recirculating tilting flume is described together with the experimental and post processing procedures and observed bimodal bed load transport. The thesis discusses the sensitivity analysis of the processing of video images used to detect the fractions proportion. The average proportion of the individual fractions computed by image processing is compared with the proportion obtained by sampling (and the sieve analysis of the sample) during the experiments. Possible errors of the methods are estimated. Finally, the work evaluates the bed porosity of bimodal mixtures. Results of own experiments are compared with predictions using models for both spherical and non-spherical particles.

Key words: Sediment transport, bimodal mixture, image processing, porosity.

Obsah:

1.	Úvod.....	9
2.	Popis sklopného žlabu a průběhu měření	10
2.1	Popis experimentů.....	10
2.2	Popis měření a vyhodnocování rychlostních profilů.....	11
2.2.1	Metody stanovení rychlosti	11
2.2.2	Porovnání rychlostních profilů.....	13
2.2.3	Odvození rychlostních profilů z naměřených dat.....	14
2.2.4	Odvození koncentračních profilů z naměřených dat	16
2.3	Popis materiálů	17
3.	Zájemové fyzikální veličiny.....	20
3.1	Vlastnosti splavenin.....	20
3.2	Tečné napětí a třecí rychlost.....	20
3.3	Veličiny popisující transport sedimentu	21
4.	Intenzivní transport dvousložkové směsi.....	22
4.1	Struktura proudění v režimu horního rovného dna	22
4.2	Odlišnosti proudění dvousložkové směsi	24
4.3	Určování poměru transportovaného množství jednotlivých frakcí.....	25
4.3.1	Určování poměru frakcí z odebraného vzorku	25
5.	Příklady využití videozáznamu pro výzkum transportu sedimentu.....	26
5.1	2D analýza pohybu jednotlivých částic.....	26
5.2	3D analýza pohybu jednotlivých částic v blízkosti stěny.....	26
6.	Určování poměru frakcí v transportované dvousložkové směsi analýzou videozáznamu	28
6.1	Popis vyhodnocování videozáznamu	28
6.2	Pokusy vybrané pro analýzu videozáznamu.....	32
6.3	Citlivostní analýza volby mezních hodnot.....	32
6.3.1	Poloha analyzovaného okna	32
6.3.2	Šířka analyzovaného okna	36
6.3.3	Výška transportní vrstvy.....	39
6.3.4	Mezní hodnoty světlosti.....	43
6.4	Porovnání výsledků analýzy videozáznamů	48
6.5	Určení možné chyby jednotlivých metod.....	53

6.5.1	Odebíraný vzorek	53
6.5.2	Analýza videozáznamu	56
7.	Pórovitost dvousložkové směsi v sedlině v závislosti na poměru frakcí.....	60
7.1	Pórovitost dvousložkové směsi v sedlině	60
7.1.1	Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Westmanova modelu a modelu Yu a kol.....	63
7.1.2	Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Mota a kol.	64
7.1.3	Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Zhanga a kol.....	64
7.2	Laboratorní stanovení pórovitosti dvousložkových směsí	65
7.2.1	Průběh měření pórovitosti dvousložkové směsi	65
7.2.2	Naměřené průběhy pórovitostí a specifických objemů dvousložkových směsí	66
8.	Závěr	71
9.	Seznam zkratk a symbolů	73
10.	Literatura	77
11.	Seznam obrázků.....	80
12.	Seznam tabulek.....	82

1. Úvod

Tématem práce je určování poměru jednotlivých frakcí sedimentu v proudění dvousložkové směsi v podmínkách laboratorního žlabu. Jednotlivé pokusy byly realizovány ve sklopném žlabu Vodohospodářské laboratoře ČVUT v Praze. Ve sklopném žlabu je možné simulovat stavy proudění ve vodním toku s intenzivním chodem sedimentu, které by v přírodě nebylo možné náležitě zkoumat a měřit. Typicky se jedná o extrémní průtokové stavy na horských tocích s velkým podélným sklonem. V případě intenzivního chodu sedimentu je nutné toto proudění uvažovat jako dvoufázové tj. směs vody a pevných částic. Lze očekávat zvýšený odpor proudění směsi vůči proudění čisté vody, tj. i zvýšení tečného napětí a množství erodovaného materiálu ze dna toku. Unikátní data ze sklopného žlabu slouží jako podklad ke kalibraci a ověření matematických modelů popisujících intenzivní proudění sedimentu. Dokonalé pochopení a poznání zákonitostí proudění s intenzivním chodem sedimentu je nutné pro ochranu obyvatel a majetku v blízkosti horských toků.

Náplní práce bylo určení poměrů jednotlivých frakcí v transportované dvousložkové směsi pomocí vyhodnocení videozáznamů jednotlivých laboratorních pokusů. V prvním kroku byla provedena citlivostní analýza určování polohy analyzovaného okna a mezních hodnot světlosti částic hrubé a jemné frakce. Poté byly určeny poměry jednotlivých frakcí pro nejoptimálnější hodnoty polohy analyzovaného okna a mezních hodnot světlosti dle výsledků citlivostní analýzy. Poměry frakcí získané pomocí videozáznamů byly porovnány s poměry získanými z odebraných vzorků. Pro obě metody byly odhadnuty jejich možné chyby. V druhé části práce byl zkoumán vliv vytržení směsi na maximální koncentraci v sedlině – porovnání teoretických modelů s laboratorním měřením.

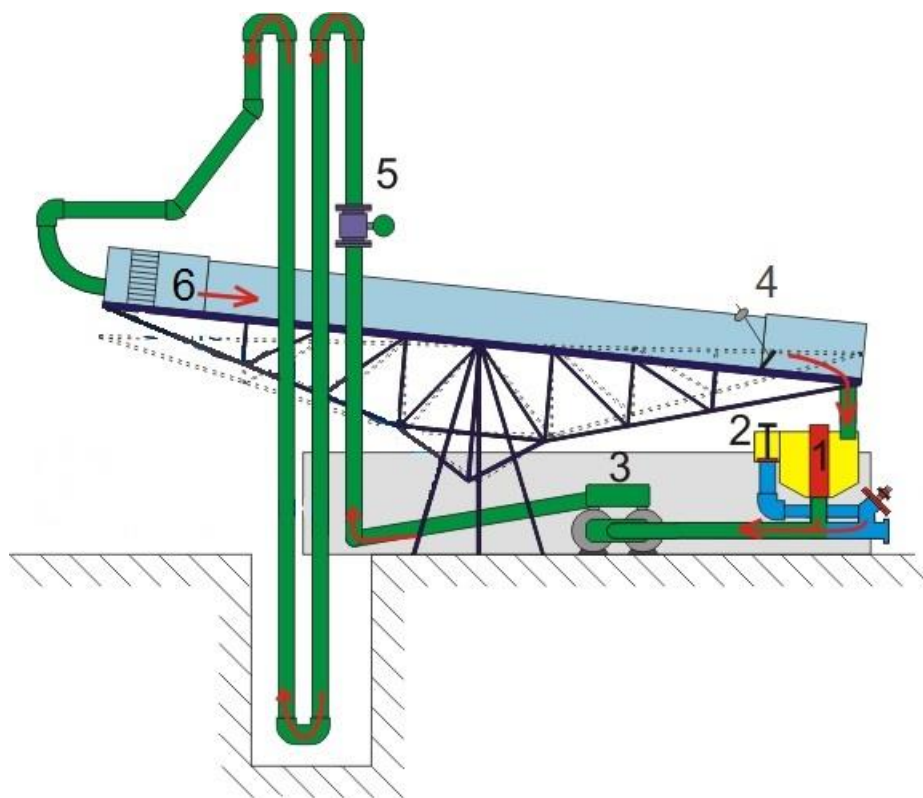
Cíle práce:

- ❖ Citlivostní analýza vyhodnocení poměru frakcí
- ❖ Zjištění poměru frakcí v proudění dvousložkové směsi
- ❖ Zjištění vlivu vytržení směsi na maximální koncentraci v sedlině

2. Popis sklopného žlabu a průběhu měření

Vlastní pokusy byly prováděny na sklopném žlabu ve Vodohospodářské laboratoři Českého vysokého učení technického v Praze. Žlab umožňuje maximální náklon $16,5^\circ$ a lze na něm docílit mnoha rozdílných stavů s intenzivním chodem sedimentu. Jedná se o žlab „recirkulační“ – tj. částice sedimentu recirkulují v uzavřeném okruhu žlabu společně s vodou. [1]

Šířka žlabu je 0,2 m a délka 8 m, nosná konstrukce žlabu je tvořena z ocelových profilů. Stěny žlabu jsou skleněné, aby bylo možné sledovat a natáčet interakci vody a částic. Dno je tvořeno neprůhlednou plastovou deskou. Schéma žlabu je na obrázku 1. Podrobný popis žlabu a jeho provozu lze nalézt například v Hlom (2016)^[1].



Obr. 1 - Schéma sklopného žlabu [1]

Legenda: 1 – uzávěr na dně dolní nádrže, 2 – uzávěr pro zvětšení kapacity přelivu dolní nádrže, 3 – čerpadla, 4 – nastavitelná klapka, 5 – průtokoměr, 6 – nátok do žlabu

2.1 Popis experimentů

Všechny experimenty, které sloužily jako podklad této práce, byly prováděny za podmínek horního režimu pohybu splavenin nad plochým dnem. V tomto režimu proudění

sedimentu se vždy vytvořil stálý podélný sklon dna a nedocházelo k tvorbě útvarů na dně (vrásky, duny, antiduny, apod.). [1]

Typický průběh experimentu začínal nastavením požadovaného průtoku směsi a požadované koncentrace. Průtok byl nastavován pomocí otáček čerpadla. Koncentrace byla nastavována pomocí náklonu žlabu a klapky na konci žlabu. Cílem bylo vytvořit v měrném úseku rovnoměrné proudění. Ze zkušeností vyplynulo, že proudění ve žlabu se nejvíce blíží rovnoměrnému, pokud sklon sedliny a žlabu je podobný. Po nastavení průtoku a koncentrace bylo vždy nutné počkat na ustálení proudění ve žlabu. [1]

Po ustálení proudění a podélného sklonu sedliny byl spuštěn záznam dat měřených veličin. Měřené veličiny byly zaznamenávány do počítače vybaveného A/D kartou pomocí aplikace vytvořené v prostředí Matlab Data Acquisition. Výsledkem experimentu byl časový záznam měřených dat. [1,2]

2.2 Popis měření a vyhodnocování rychlostních profilů

Pro správné porozumění intenzivního transportu sedimentu v otevřených korytech je nutné znát rozdělení rychlostí po svislici. Znalost rychlostní profilu je nutná pro výpočet celkového poměru jemné frakce v transportované dvousložkové směsi $F_{j,celk}$, pomocí níže použité metody analýzy videozáznamu.

V transportní vrstvě, nacházející se u dna, je vysoká koncentrace částic, která znesnadňuje měření rychlosti kapaliny. Pro měření na sklopném žlabu byly vybrány tři nezávislé metody – Prandtlůva trubice, Ultrasonic Velocity Profiler a Acoustic Doppler Velocity Profiler. Podélné složky rychlostí byly měřeny v ose žlabu 4,2 metru od vstupního profilu. V tomto místě se již nacházelo rovnoměrné proudění. [2]

2.2.1 Metody stanovení rychlosti

Prandtlůva trubice (PT) – referenční měření rychlosti bylo provedeno pomocí Prandtlůvy trubice (vnější průměr 6 mm, průměr otvoru 1,2 mm) napojené na diferenční tlakoměr Siemens (SITRANS) o rozsahu 0,6 m. Pro každý měřený bod bylo pomocí diferenčního tlakoměru změřeno 4500 hodnot rozdílů tlaků s frekvencí 100 Hz, z kterých byla následně vypočtena průměrná hodnota rychlosti. Prandtlůva trubice měří hydrostatický tlak (odběry se nacházejí na boku trubice) a celkový tlak (odběr se nachází na špičce trubice,

směrem proti proudu), odečtem těchto tlaků lze získat dynamický tlak – rychlostní výšku h_v , z níž lze snadno vypočítat rychlost proudění u :

$$u = \sqrt{2 \cdot g \cdot h_v} \quad [m/s] \quad (2-1)$$

Vzdálenost bodových rychlostí po výšce v ose žlabu byla 4 mm v části proudění čisté vody a 2 mm v transportní vrstvě. [2]

Ultrasonic Velocity Profiling (UVP) – metoda UVP je založena na měření doby návratu ultrazvukového signálu a změny jeho frekvence. Pozici měření rychlosti před sondou X lze vypočítat z doby návratu signálu do sondy:

$$X = \frac{u_{ult} \cdot t}{2} \quad [m] \quad (2-2)$$

Kde u_{ult} je rovno rychlosti šíření ultrazvukového signálu ve vodě a t je délka doby návratu odraženého signálu. Rychlost proudění v místě odrazu u (za uvážení předpokladu, že rychlost částice, od níž se signál odrazil, je rovna rychlosti proudění) lze vypočítat ze znalosti frekvence vyslaného signálu f_0 a změřené frekvence odraženého signálu dle Dopplerova jevu f_d :

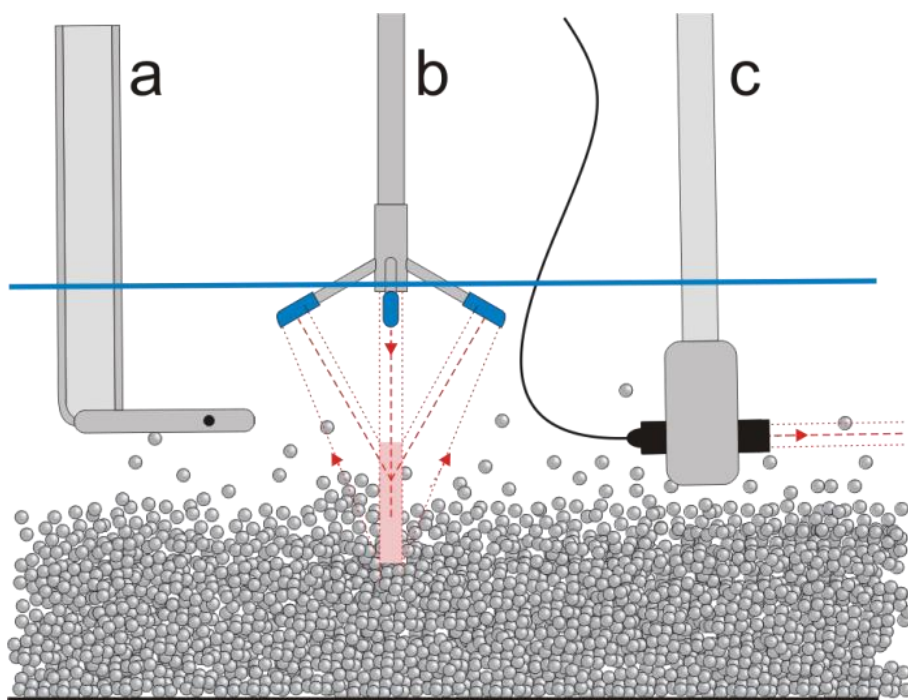
$$u = \frac{u_{ult} \cdot f_d}{2 \cdot f_0} \quad [m/s] \quad (2-3)$$

Sonda použitá pro měření bodových rychlostí měla vnější průměr 8 mm a 5 mm vnitřní aktivní průměr. Sonda byla namířena proti směru proudění a rychlost byla odečítána 20, 25 a 30 mm před čelem sondy ve stejných místech jako byly odečítány rychlosti pomocí ostatních metod. Jednotlivé bodové rychlosti byly vyhodnoceny vždy ze záznamu 1500 vzorků se vzorkovací frekvencí 50 – 70 Hz. Vzdálenost bodových rychlostí po výšce byla stejná jako pro měření Prandtllovou trubicí. [2,3]

Acoustic Doppler Velocity Profiler (ADVP) – pro měření rychlostí bylo použito zařízení ADVP (Nortek SA, Vectrino Profiler), umožňující stanovení aktuálního 3D vertikálního rychlostního profilu o výšce 30 mm s vertikálním rozlišením 1 mm. Měření v každé poloze zařízení se skládalo ze 4760 vzorků s frekvencí záznamu 100 Hz. Schéma sondy je znázorněno na obrázku 2, červeně je šrafováno zobrazena výška, v které jsou měřeny rychlosti. Pomocí této sondy není možné zjistit rychlosti v blízkosti hladiny, neboť sonda musí být ponořena pod vodu. Při větší hloubce proudění se celkový rychlostní profil získá složením vícero naměřených profilů. Vlastní sonda je tvořena jedním vysílačem signálu a čtyřmi

přijímači, dva přijímače byly natočeny v rovině osy žlabu a sloužily pro vyhodnocení podélných složek rychlostí.

Rychlost proudění je vypočítána na základě Dopplerova jevu - změně frekvence odraženého signálu, změna frekvence odraženého signálu je závislá na rychlosti částice, od níž se odráží. Poloha místa odrazu signálu je obdobně jako v metodě UVP vypočítána z doby návratu odraženého signálu. [2,3]



Obr. 2 – Schéma jednotlivých snímačů rychlosti [2]

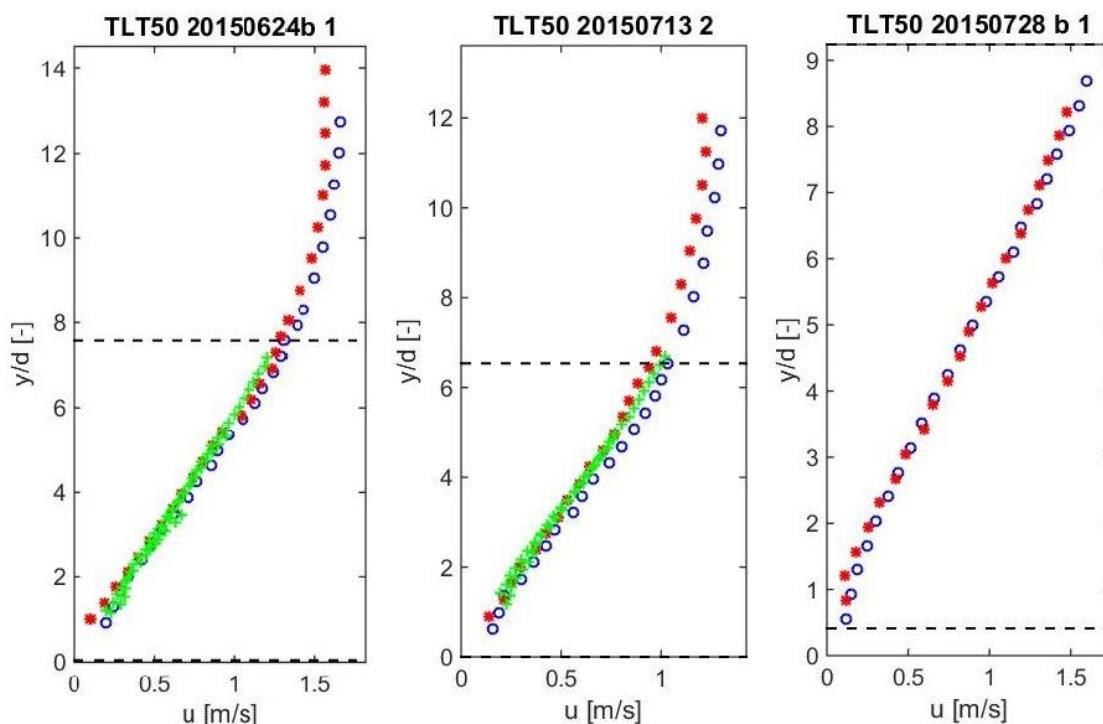
Legenda: a – Prandtlova trubice, b – Acoustic Doppler Velocity Profiler, c- Ultrasonic Velocity Profiling

2.2.2 Porovnání rychlostních profilů

Na obrázku 3 jsou zobrazeny vertikální rychlostní profily časově středních rychlostí v ose žlabu měřených třemi výše zmíněnými metodami. Pro ilustraci jsou zobrazeny tři rozdílné průtokové stavy – dva stavy s nižším chodem sedimentu a jeden stav s intenzivním chodem sedimentu. [2]

Ze zobrazených rychlostních profilů lze vypočítat dobrou shodu mezi referenčním měřením Prandtlovou trubicí a metodou UVP. K největším relativním rozdílům dochází v blízkosti sedliny v místě vysokých dopravních koncentrací, zde je metoda UVP hodně ovlivněna vysokou koncentrací částic. Metoda ADVP také prokazuje velmi dobrou shodu s referenčním měřením, vyjma oblasti v blízkosti sedliny.

Závěry z práce Zrostlík a kol. (2014) ^[2] – jednotlivé metody prokazují dobrou shodu naměřených rychlostí pro různé průtokové podmínky, větší rozdíly se vyskytují pouze při vyšších dopravních koncentracích a v blízkosti sedliny. U metody UVP a ADVP je důležitá filtrace odlehlých dat způsobených rozptylem ultrazvukového signálu (při vyšší dopravní koncentraci částic). [2]

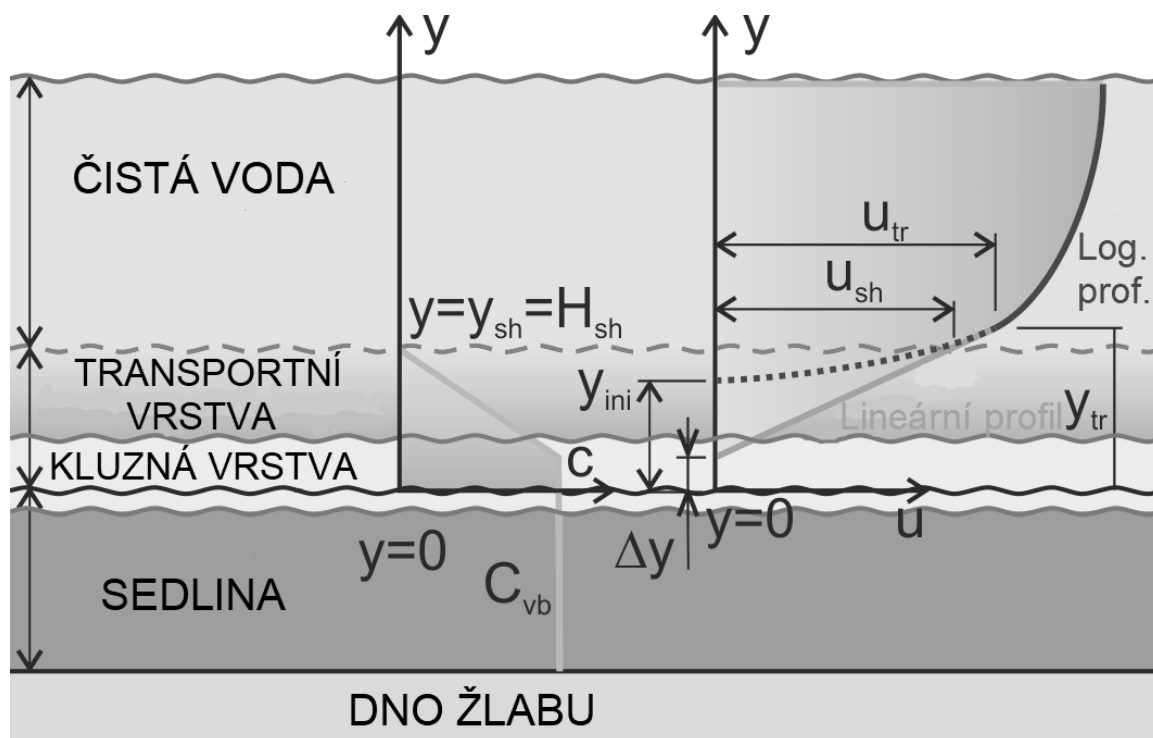


Obr. 3 – Vertikální rychlostní profily

Legenda: ○ - Prandtlůva trubice, + - Acoustic Doppler Velocity Profiler, ✱ - Ultrasonic Velocity Profiling
 - - - vrchol transportní vrstvy

2.2.3 Odvození rychlostních profilů z naměřených dat

Pro další analýzy je nutné rychlosti naměřené třemi metodami proložit jedním reprezentativním rychlostním profilem. Schéma rychlostního profilu je zobrazeno na obrázku 4. V části proudění čisté vody lze použít logaritmickou rovnici pro hydraulicky drsné dno, její platnost pro použití v podmínkách intenzivního transportu sedimentu v režimu horního rovného dna byla ověřena v práci Zrostlík a kol. (2014) ^[5]. Logaritmický profil plynule přechází do lineárního profilu v blízkosti transportní vrstvy. V transportní vrstvě je na základě naměřených rychlostí předpokládán lineární profil (obrázek 4), tento předpoklad je také potvrzen v práci Capart and Fraccarollo (2011) ^[4]. To samé platí pro koncentrační profil, jehož tvar je také předpokládán jako lineární. [5]



Obr. 4 – Struktura proudění dvousložkové směsi v režimu horního dna [5]

V oblasti proudění čisté vody lze použít logaritmickou rovnici pro hydraulicky drsné dno:

$$\frac{u}{u_{*b}} = 2,5 \ln \left(B \frac{y - y_{ini}}{k_s} \right) \quad (2-4)$$

kde u = rychlost proudění, u_{*b} = třecí rychlost vztažená ke dnu, B = konstanta (typická hodnota = 30), y = výška nad sedlinou, y_{ini} = teoretická poloha počátku logaritmického profilu nad sedlinou, k_s = ekvivalentní drsnostní výška povrchu dna. [6]

V transportní vrstvě je uvažován lineární rychlostní profil, který lze popsat ve tvaru:

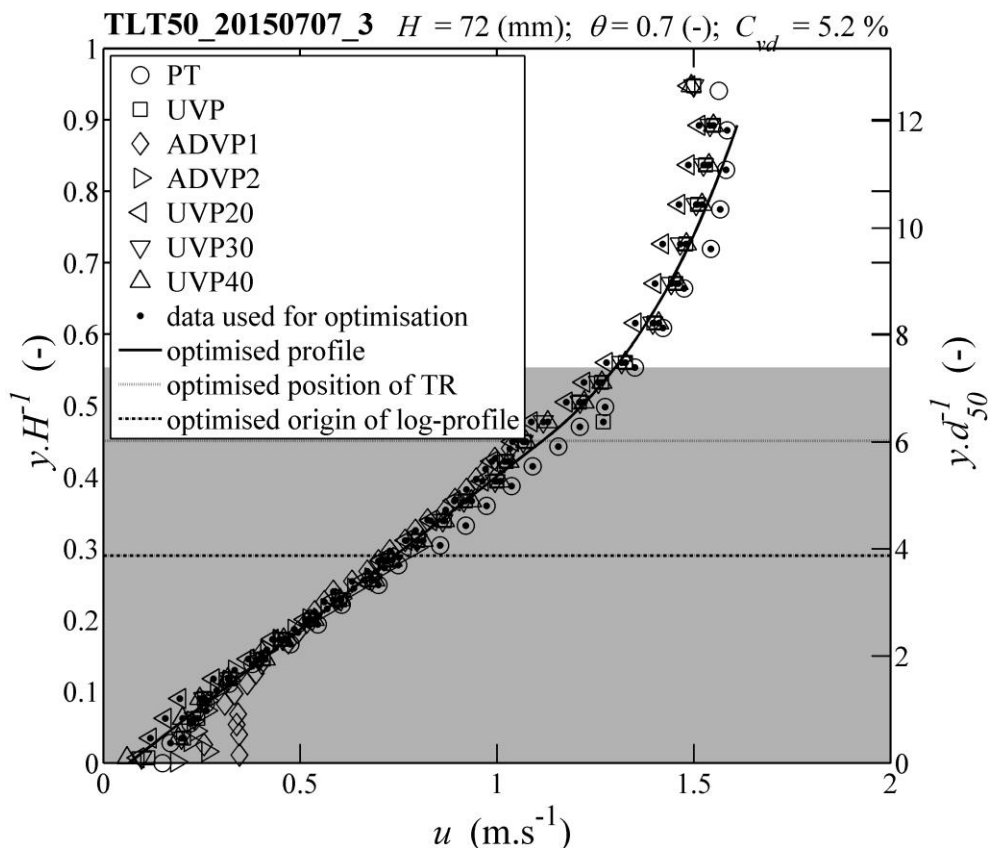
$$\frac{u}{u_{tr}} = \frac{y - \Delta y}{y_{tr} - \Delta y} \quad (2-5)$$

kde Δy = poloha nulové rychlosti nad sedlinou, y_{tr} = poloha nad sedlinou, v níž přechází logaritmický profil na lineární, u_{tr} = rychlost proudění v místě přechodu. Případně lze uvažovat:

$$\frac{u}{u_{sh}} = \frac{y - \Delta y}{y_{sh} - \Delta y} \quad (2-6)$$

kde y_{sh} = poloha vrcholu transportní vrstvy a u_{sh} = rychlost proudění v místě vrcholu transportní vrstvy. [6]

Neoptimálnější proložení naměřených dat probíhalo pomocí metody nejmenších čtverců, výsledkem byly optimalizované hodnoty parametrů definujících strukturu rychlostního profilu - y_{ini} , y_{tr} a Δy . Podrobný popis optimalizace lze nalézt v Zrostlík a kol. (2014)^[5] nebo Matoušek a kol. (2015)^[6]. Pro ukázkou je na obrázku 5 zobrazen výsledný proložený optimalizovaný profil. [6]



Obr. 5 – Proložený optimalizovaný profil

Legenda – bílé pozadí (proudění čisté vody), šedé pozadí (transportní vrstva)

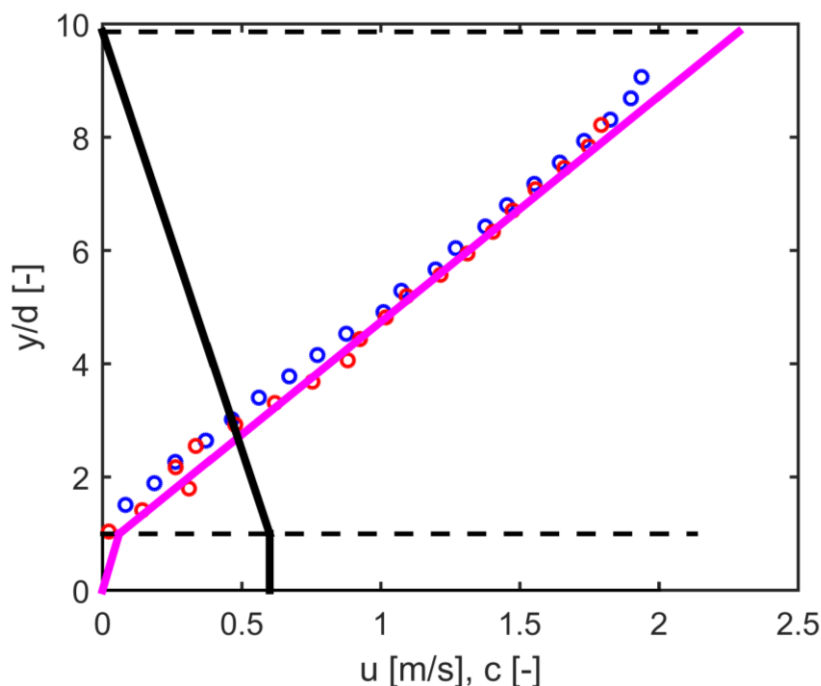
2.2.4 Odvození koncentračních profilů z naměřených dat

Koncentrační profil je uvažován lineární v transportní vrstvě a konstantní v kluzné vrstvě. V kluzné vrstvě je uvažována koncentrace stejná jako koncentrace částic v nepohyblivé sedlině, neboť v kluzné vrstvě se částice pohybují ve vrstvách a jsou v neustálém kontaktu. Na vrcholu transportní vrstvy je uvažována nulová koncentrace částic, hodnota koncentrace na spodním okraji transportní vrstvy byla dopočítávána dle

naměřeného rychlostního profilu, integrálních dat (celkový průtok a střední dopravní koncentrace) a dle výše zmíněných předpokladů o tvaru koncentračního profilu po výšce dle vzorce 2-7.

$$Q_s = C_{vd} \cdot Q = \int_0^{h_t} u \cdot c \cdot b \left[m^3 / s \right] \quad (2-7)$$

Příklad odvozeného koncentračního profilu pro směs materiálů HT je zobrazen na obrázku 6, v transportní vrstvě je uvažován lineární profil, který končí na dolní hraně transportní vrstvy na hodnotě dopravní koncentrace 60 %. V kluzné vrstvě je uvažována konstantní hodnota dopravní koncentrace 60 % odpovídající koncentraci sedliny.



Obr. 6 – Proložený optimalizovaný profil

Legenda: – koncentrační profil, – rychlostní profil, □ PT, □ UVP, - - hranice transportní vrstvy

2.3 Popis materiálů

Částice sedimentu v experimentech představovaly plastové granule (neměkčené PVC) a skleněné technické kuličky. Plastové částice díky své menší hustotě dovolují dosáhnout vyšších hodnot dopravní koncentrace. Hustota technických skleněných kuliček se blíží hustotě křemičitého písku a štěrku. V této práci jsou řešeny pokusy s dvousložkovými směsmi: HT = HSF3 + TLT50 a sTK1230 = TK1216 + TK30. Dále byly vytvořeny dvě nové směsi, které nebyly zkoumány na sklopném žlabu, pro potřeby kapitoly určování pórovitosti dvousložkové směsi v závislosti na poměru frakcí: HT25 = TLT25 + HSF3 a sTK1270 =

TK1216 + TK30. Základní vlastnosti jednotlivých materiálů a směsí zjištěné laboratorně jsou zobrazeny v tabulce 1 – hustota částic ρ_s , usazovací rychlost u_t , ekvivalentní průměr částice d_v (průměr koule o stejném objemu jako je objem nekulové částice) a střední velikost zrna d_{50} zjištěná síťovým rozborem. Zobrazené vlastnosti směsí jsou ilustrativní a odpovídají směsi, v níž jsou obě frakce zastoupeny rovnoměrně. Při vlastních analýzách byly vždy uvažovány vlastnosti směsí dle aktuálního poměru jednotlivých frakcí.

Tabulka 1 – Základní vlastnosti použitých materiálů

	ρ_s [kg/m ³]	u_t [m/s]	d_v [mm]	d_{50} [mm]
HSF3	1359	0.131	3.2	
TLT50	1307	0.149	5.4	
HT	1333	0.140		
HSF3	1359	0.131	3.2	
TLT25	1377	0.106	4.0	
HT25	1368	0.119		
TK1216	2481	0.207		1.5
TK30	2501	0.309		3.0
sTK1230	2491	0.258		
TK1216	2481	0.207		1.5
TK70	2490			7.0
sTK1270	2486			

ρ_s – hustota částic, u_t – usazovací rychlost, d_v – ekvivalentní průměr částice, d_{50} – střední velikost zrna

Materiál Hostaform (HSF3) jsou bílé částice tvaru elipsoidu, ve směsi s označením HT tvoří jemnou frakci. Materiál Tiulit 50 (TL50) je tvořen černými válci o průměru 4,8 mm a výšce 4,9 mm, ve směsi HT tvoří hrubou frakci.

Směs HT25 je tvořena materiálem Hostaform (HSF3), jemná frakce a materiálem Tiulit 25, hrubá frakce. Materiál Tiulit 25 (TLT 25) je tvořen bílými čookami o průměru 4,8 mm a výšce 2,2 mm.

Směs sTK1230 je tvořena technickými kuličkami frakcí 1,2 - 1,6 (sTK1216 – průměr 1,2 až 1,6 mm se středním zrnem o velikosti 1,5 mm) a skleněnými kuličkami o průměru 3 mm (TK30).

Směs sTK1270 je tvořena technickými kuličkami frakcí 1,2 - 1,6 (sTK1216 – průměr 1,2 až 1,6 mm se středním zrnem o velikosti 1,5 mm) a skleněnými kuličkami o průměru 7 mm (TK70).

Materiály použité při pokusech na sklopném žlabu jsou zobrazené na obrázku 7. Všechny materiály jsou stabilní a nevykazovaly známky mechanického opotřebení i po mnoha hodinách oběhu směsi ve žlabu.



Obr. 7 – Materiály pevné fáze

Jednotlivé experimenty na sklopném žlabu zahrnovaly mnoho rozlišných stavů proudění ve žlabu. Rozsah hodnot parametrů proudění je zobrazen v tabulce 2.

Tabulka 2 – Rozsah parametrů proudění

	H		Q		I_e		C_{vd}	
	[mm]		[l/s]		[-]		[-]	
	min	max	min	max	min	max	min	max
HSF3	29	115	4.6	18.9	0.002	0.058	0.010	0.251
TLT50	40	101	5.8	16.2	0.003	0.055	0.010	0.294
HT	38	91	5.7	14.1	0.008	0.054	0.010	0.260
TK1216	24	62	4.6	15.1	0.018	0.061	0.005	0.037
TK30	36	71	5.0	15.9	0.003	0.087	0.001	0.069
sTK1230	38	66	7.3	15.0	0.022	0.060	0.008	0.037

3. Zájmové fyzikální veličiny

V této kapitole je zobrazen souhrn vlastností splavenin a charakteristik proudění směsi.

3.1 Vlastnosti splavenin

Hustota splaveninové částice je poměrem její hmotnosti m a objemu V . Běžně se hustota křemičitých splavenin v přírodě pohybuje okolo hodnoty $\rho_s=2650 \text{ kg/m}^3$. [1]

$$\rho_s = \frac{m}{V} [\text{kg} / \text{m}^3] \quad (3-1)$$

Relativní hustota splaveninové částice je poměr hustoty splaveninové částice vůči hustotě vody. [1]

$$s = \frac{\rho_s}{\rho_w} [-] \quad (3-2)$$

Střední velikost zrna se značí d_{50} . Hodnota střední velikosti zrna je rovna statistickému průměru velikosti jednotlivých zrn. Při síťovém rozboru je hodnota d_{50} rovna velikosti oka, kterým propadne 50% všech zrn. [1]

3.2 Tečné napětí a třecí rychlost

Eroze zrnitého dna a transport materiálu začíná při překročení kritického tečného napětí působícího na povrch dna. Při překročení kritického tečného napětí začíná převažovat unášecí síla vodního proudu, která překoná odpor částice a uvede ji do pohybu. [1]

Tečné napětí lze vypočítat dle následujícího vztahu:

$$\tau_o = \rho_w \cdot g \cdot R \cdot i [\text{Pa}] \quad (3-3)$$

Poměr průtočného profilu vůči omočenému obvodu je roven hydraulickému poloměru. V případě širokého koryta s konstantní hloubkou lze uvažovat hydraulický poloměr jako střední hloubku proudění. [1]

$$R = \frac{S}{O} [m] \quad (3-4)$$

Tečné napětí na dně je často vyjadřováno pomocí třecí rychlosti u_* : [1]

$$u_* = \sqrt{\frac{\tau_0}{\rho_w}} = \sqrt{g \cdot R \cdot i} [m/s] \quad (3-5)$$

Při hledání optimálního proložení rychlostních profilů je zapotřebí znát třecí rychlost vztaženou ke dnu:

$$u_{*,b} = \sqrt{g \cdot R_b \cdot i} [m/s] \quad (3-6)$$

Shieldsovo číslo je bezrozměrné číslo popisující smykové napětí na povrchu dna. Shieldsovo číslo vyjadřuje poměr setrvačné síly proudící vody nade dnem, která svým smykovým účinkem působí jako hnací síla na dnové částice, vůči hmotnosti částice zmenšené o vliv vztlakové síly. [1]

$$\theta = \frac{\tau_0}{\rho_w \cdot (s-1) \cdot g \cdot d} = \frac{v_*^2}{(s-1) \cdot g \cdot d} \quad (3-7)$$

3.3 Veličiny popisující transport sedimentu

Střední dopravní koncentrace splavenin je poměr průtoku splavenin v transportované směsi vůči celkovému průtoku směsi. [1]

$$C_{vd} = \frac{Q_s}{Q} \cdot 100\% [\%] \quad (3-8)$$

4. Intenzivní transport dvousložkové směsi

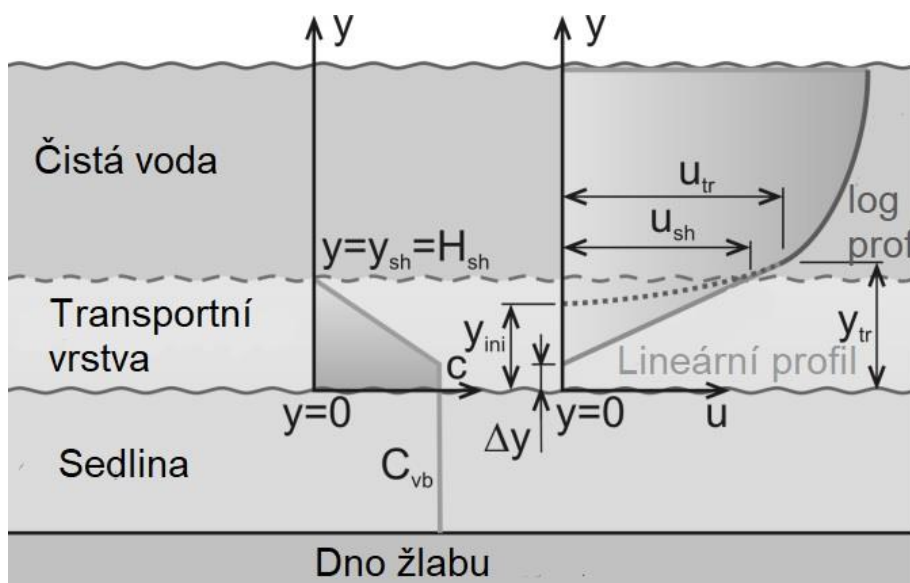
Transport sedimentu ve vodním toku má zásadní vliv na morfologii a stabilitu vlastního koryta a dále také na průběh povodně a velikost následných povodňových škod. Vlastní koryto toku bývá tvořeno dnovým materiálem rozličné velikosti (písek, štěrk, kameny a valouny), který je během povodní transportován. Rozdílně velká zrna mají odlišnou mobilitu a rozdílně spolupůsobí s proudící vodou, tento složitý systém není snadné fyzikálně popsat. Z tohoto důvodu zvolila řada autorů, např. Bel a kol.(2013)^[7], jako první krok studia proudění směsí různě velkých částic studium transportu dvousložkových směsí (sediment je tvořen dvěma frakcemi o rozdílné velikosti). [8]

Pro dvousložkové směsi je typické vertikální třídění zrn. Při běžných vodních stavech ve vodních tocích dochází k tvorbě takzvané krycí vrstvy, kdy jsou malá zrna erodována a na dně toku zůstávají pouze velká zrna tvořící krycí vrstvu. Toto ovšem neplatí při intenzivním transportu sedimentu v režimu horního rovného dna. V tomto režimu je krycí vrstva nahrazena takzvanou kluznou vrstvou tvořenou pouze menšími částicemi. Kluzná vrstva se nachází mezi sedlinou a transportní vrstvou. [8,9]

Sediment byl při pokusech představován dvěma materiály o rozdílných frakcích a barvách – HSF3 a TLT50. Obě frakce byly v dvousložkové směsi, označované jako HT, zastoupeny rovnoměrně. Před každým pokusem byla směs ve žlabu promíchána, aby v každé její části byly oba materiály zastoupeny rovnoměrně. Následně byl ve žlabu nastaven požadovaný stav proudění a již během pár minut bylo možné pozorovat vertikální třídění směsi. V sedlině byly obě frakce zastoupeny rovnoměrně.

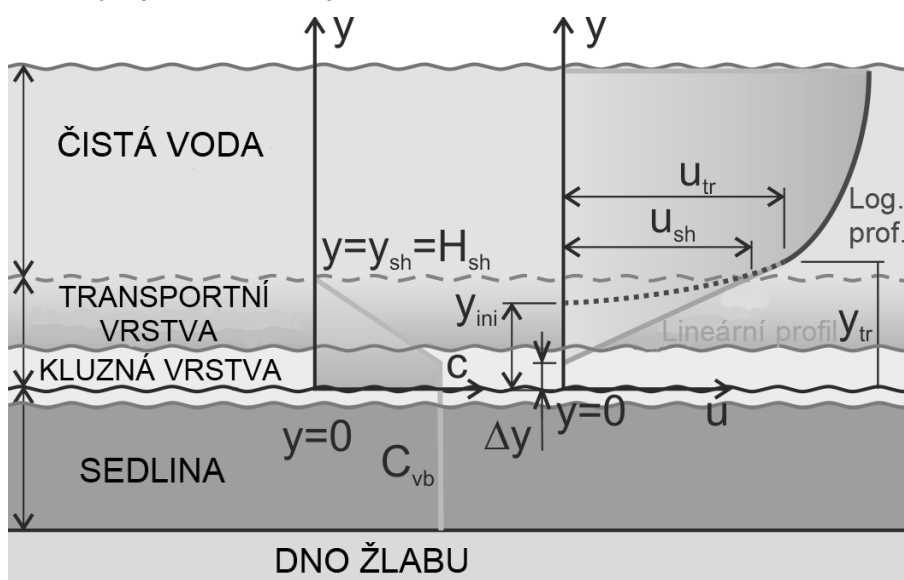
4.1 Struktura proudění v režimu horního rovného dna

Struktura proudění jedné frakce a proudění dvousložkové směsi se liší. Proudění jedné frakce lze rozdělit do tří vrstev (obrázek 8) – vrchní část obsahující pouze čistou vodu a občasné saltující částice vymrštěné nárazem z transportní vrstvy, transportní vrstvu a sedlinu.



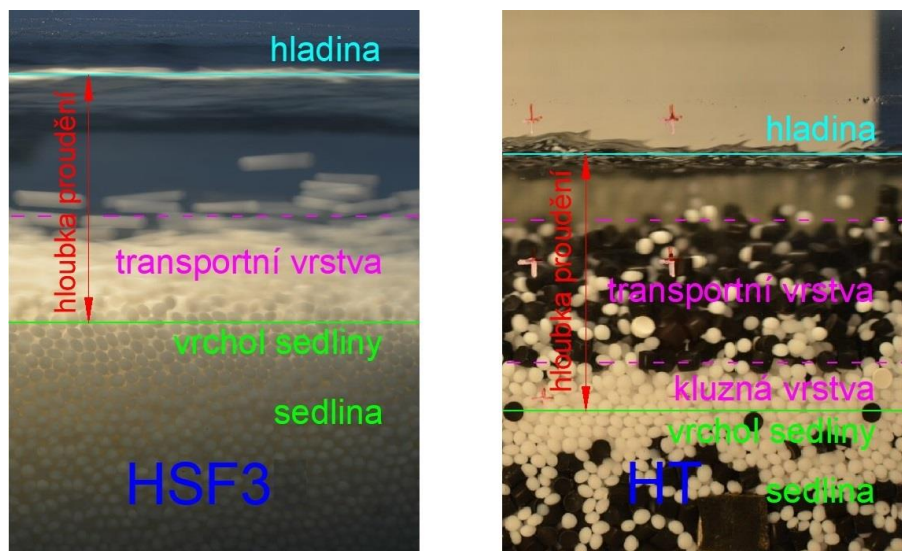
Obr. 8 – Struktura proudění sedimentu o jedné frakci [10]

Při proudění dvousložkové směsi se na rozhraní sedliny a transportní vrstvy vytváří čtvrtá vrstva tvořená pouze menší frakcí směsi – kluzná vrstva (obrázek 4). Kluzná vrstva oddělující transportní vrstvu od sedliny vzniká jako důsledek vertikálního třídění směsi v transportní vrstvě. Pokud je velký rozdíl ve velikosti částic v dvousložkové směsi, malá zrna propadají mezerami mezi velkými zrny. Pakliže jsou menší zrna moc velká, aby dokázala propadnout mezerami mezi většími zrny, malá zrna propadají směrem dolů mezerami vytvořenými díky kolizím mezi velkými zrny. Velikost mezer mezi zrny způsobených kolizemi částic v transportní vrstvě se neustále mění. Kluznou vrstvu lze rozdělit na dvě části – horní, v níž se zrna pohybují a dolní, v níž jsou zrna v klidu. [8,9]



Obr. 4 – Struktura proudění dvousložkové směsi v režimu horního dna [5]

Na obrázku 9 jsou zobrazeny fotografie z pokusů porovnávající a znázorňující proudění sedimentu o jedné frakci a dvousložkové směsi.



Obr. 9 – Foto proudění – porovnání proudění částic jedné frakce a dvousložkové směsi

4.2 Odlišnosti proudění dvousložkové směsi

Ve sklopném žlabu byly nejprve měřeny oba dva materiály (HSF3 a TLT50) zvlášť a následně byla zkoumána směs obou materiálů. Materiály byly zastoupeny ve směsi rovnoměrně, tj. 50% bylo tvořeno HSF3 a 50% TLT50. Podrobnou analýzu výsledků jednotlivých materiálů a směsi lze nalézt v práci Zrostlík a Matoušek (2016)^[8]. Podrobnou analýzu výsledku jednotlivých materiálů a směsi skleněných technických kuliček lze nalézt v Zrostlík a kol. (2015)^[10].

Pozorováním proudění na sklopném žlabu a videí pořízených při pokusech bylo zjištěno, že je kluzná vrstva při proudění dvousložkové směsi relativně tlustá a stabilní i při vysokých tečných napětích. Oproti tomu při proudění samotného jemnějšího materiálu HSF3 se vytváří obdobná vrstva, která bývá tlustší, ale značně nestálější a výškově proměnná. [8]

Z analýzy výsledků vyplynuly následující závěry – poměr frakcí v transportované směsi je nezávislý na Shieldsově číslu, pokud je Shieldsovo číslo větší než cca 1. Kluzná vrstva se tvoří mezi transportní vrstvou a sedlinou jako výsledek vertikálního třídění dvousložkové směsi. Drsnost dna je při dvousložkovém transportu menší než při transportu každé frakce samostatně při Shieldsově číslu větším než jedna. Menší drsnost je nejspíše způsobena vzniklou kluznou vrstvou, která tvoří dno hydraulicky hladším. [8]

4.3 Určování poměru transportovaného množství jednotlivých frakcí

Poměr jednotlivých frakcí v transportované dvousložkové směsi byl při pokusech na sklopném žlabu určován síťovým rozborem vzorku odebraného na konci každého měření. Celkový poměr hrubší frakce částic v transportované směsi $F_{h,celk}$ lze vyjádřit následovně:

$$F_{h,celk} = \frac{Q_h}{Q_h + Q_j} = \frac{Q_h}{Q_s} \quad [-] \quad (4-1)$$

Kde Q_h je průtok hrubé frakce, Q_j je průtok jemné frakce a Q_s je celkový průtok částic v transportované dvousložkové směsi. Případně poměr jemné frakce $F_{j,celk}$ lze vyjádřit:

$$F_{j,celk} = 1 - F_{h,celk} \quad [-] \quad (4-2)$$

4.3.1 Určování poměru frakcí z odebraného vzorku

Na konci každého experimentu byl odebrán vzorek. Délka doby odběru vzorku by neměla být příliš krátká, aby bylo možné považovat vzorek za reprezentativní a zároveň ani příliš dlouhá, aby nedošlo k ovlivnění proudění v recirkulačním žlabu. Vzorek byl odebrán do pytle ze síťoviny a vysušen. Po oschnutí všech částic byl odebraný vzorek roztříděn pomocí sít. Následně byly roztříděné částice zváženy a dle známé hustoty byl počítán jejich objem. Poměr hrubých částic lze vyjádřit:

$$F_{h,celk} = \frac{V_h}{V_h + V_j} \quad [-] \quad (4-3)$$

Kde V_h je objem částic hrubé frakce bez pórů a V_j je objem částic jemné frakce bez pórů. Výsledný poměr frakcí slouží jako referenční hodnota pro určování poměrů jednotlivých frakcí pomocí analýzy videozáznamu.

5. Příklady využití videozáznamu pro výzkum transportu sedimentu

Hlavní náplní této diplomové práce je určování $F_{j,celk}$ pomocí analýzy videozáznamu. V této kapitole jsou nastíněny různé příklady využití videozáznamu při výzkumu transportu sedimentu. Využití videozáznamu se s rozvojem nahrávací a výpočetní techniky uplatňuje v čím dál větší míře.

5.1 2D analýza pohybu jednotlivých částic

Analýzou transportu dvousložkové směsi sedimentu, za využití videozáznamu, se zabýval například Hergault a kol. (2010)^[11]. Pokusy probíhaly v úzkém žlabu (6.5 mm) s částicemi o poloměrech 4 a 6 mm, vlastní proudění částic bylo pouze dvourozměrné. Všechny pokusy byly natáčeny rychloběžnou kamerou s frekvencí záznamu 131.2 snímků za vteřinu za stále stejných světelných podmínek. Velká frekvence snímání je potřebná proto, aby se poloha částice v pohybu na každém snímku lišila maximálně o její poloměr. Tato podmínka je důležitá pro správné fungování výpočetních algoritmů.^[11]

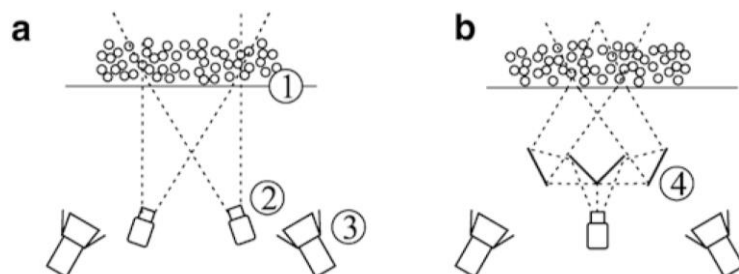
Ze získaných záznamů proudění byla pomocí výpočetních skriptů analýzy videozáznamů zjištěna velikost, pozice na každém snímku, trajektorie a styl pohybu každé částice (valení po dně, saltování) a dále také velikost sousedních částic. Z dosažených výsledků bylo možné získat rychlostní profil částic po výšce, představu o chování různých velikých částic při transportu dvousložkové směsi apod. [11]

Z výsledků výzkumu je patrné, že pokud máme k dispozici kameru s dostatečně velkou frekvencí záznamu a pokusy jsou nahrávány za stejných světelných podmínek, lze dosáhnout velmi podrobných výsledků o pohybu každé částice v blízkosti stěny žlabu.

5.2 3D analýza pohybu jednotlivých částic v blízkosti stěny

Analýzou transportu jednosložkového sedimentu ve žlabu o šířce 20 cm za využití videozáznamu se zabýval Spinewine a kol. (2003)^[12]. Za využití stereoskopického snímání byla vypočítána prostorová pozice částic v blízkosti průhledné stěny žlabu. Možnosti stereoskopického snímání jsou zobrazeny na obrázku 10:a) dvě kamery snímající stěnu

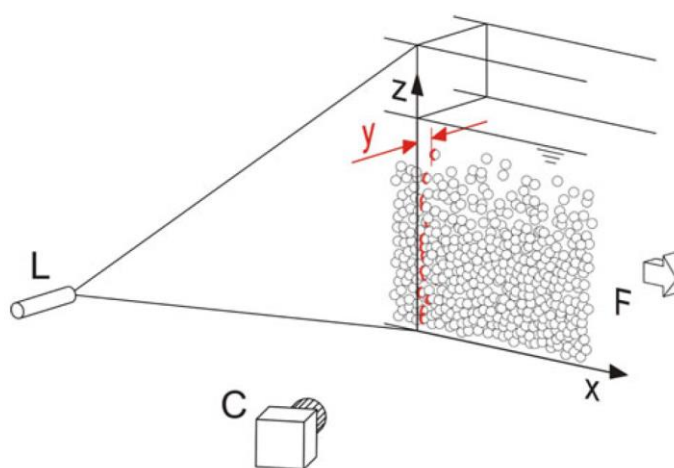
žlabu pod různými úhly, b) jedna kamera zaměřená na systém zrcadel. Snímaný prostor je rozdělen pomocí Voroného diagramů na jednotlivé oblasti představující částice, s nimiž je dále počítáno. Pomocí této metody je možné zjistit trajektorii a rychlost jednotlivých částic a objemovou koncentraci částic v blízkosti průhledné stěny. Detailní popis této metody je zobrazen v článku Spinewine a kol. (2003)^[12]. [12]



Obr. 10 – Možnosti stereoskopického snímání [12]

Legenda: 1 – průhledná stěna, 2 – vysokorychlostní kamera, 3 – osvětlení, 4 - zrcadla

Výše zmíněná metoda je ovšem náročná na výpočetní techniku, čas a přesnost stereoskopického snímání. Stejný řešitelský tým přišel s novou metodou pro zjištění objemové koncentrace v blízkosti stěny, která již nevyžaduje stereoskopické snímání a její řešení již není tak výpočetně náročné. Schéma této metody je zobrazeno na obrázku 11, na stěnu žlabu je promítán tenký laserový paprsek, který je zaznamenáván rychloběžnou kamerou (v tomto případě 500 snímků/s). Ze záznamů je následně odečítána vzdálenost promítnutého paprsku na částici od stěny žlabu (na obrázku 11 označená jako y). Na základě autory odvozeného a experimentálně určeného vztahu mezi průměrnou vzdáleností promítnutého paprsku od stěny žlabu a objemovou koncentrací je určen průběh objemové koncentrace po výšce. Podrobný popis metody lze nalézt v Spinewine a kol. (2011)^[13]. [13]



Obr. 11 – Schéma měření pozice promítnutého laserového paprsku [13]

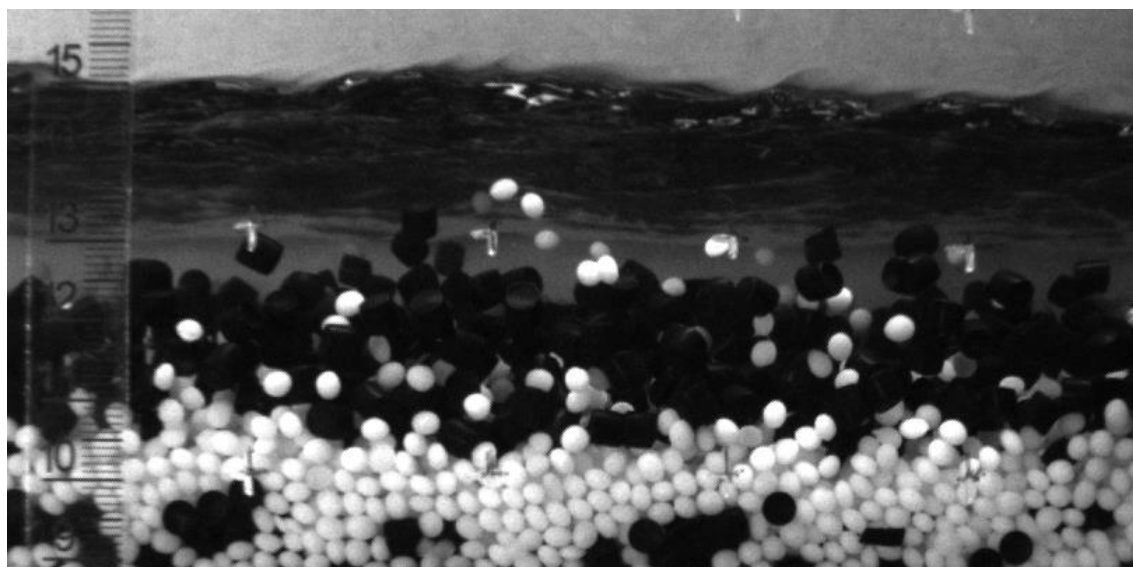
Legenda: L – laserový zářič, C – vysokorychlostní kamera, y – měřená vzdálenost promítnutého paprsku na částici od stěny žlabu, F – směr proudu

6. Určování poměru frakcí v transportované dvousložkové směsi analýzou videozáznamu

Hlavním tématem této diplomové práce je určování aktuálního a průměrného poměru frakcí v proudění dvousložkové směsi pomocí analýzy videozáznamu. Analýza byla prováděna pomocí skriptu v programovém prostředí MATLAB vytvořeným Ing. Štěpánem Zrostlíkem.

6.1 Popis vyhodnocování videozáznamu

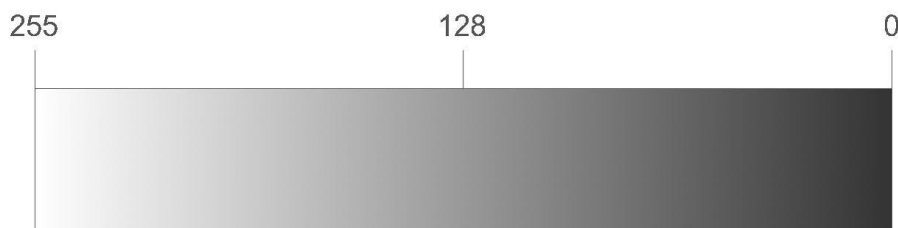
Součástí každého pokusu na sklopném žlabu byl desetivteřinový černobílý záznam kamerou „Basler Scout scA1000-30fm“ s objektivem „Fujinon 1:1.2/6mm DF6HA-1B“. Frekvence snímání kamery byla 50 snímků za vteřinu s rozlišením 812 krát 402 pixelů. Záznam každého pokusu byl tvořen celkem 500 snímky. Typický snímek proudění je zobrazen na obrázku 12. Kamera snímala záznam kolmo vůči stěně žlabu.



Obr. 12 – Záznam proudění

Skript provedl načtení všech snímků pro daný měřený stav a dále převedl barvy na každém snímku z barevného modelu RGB na barevný model stupňů šedé. Barevný model stupňů šedé definuje barvu pomocí jedné složky – světlosti. Minimální hodnota 0 značí nulovou světlost – černou barvu, naopak maximální hodnota světlosti 255 značí bílou barvu. Barevný model je schematicky zobrazen na obrázku 13. Dále byly zadány hranice

analyzované oblasti: horní – vrchol transportní vrstvy, dolní – vrchol sedliny, levá a pravá – maximální vzdálenost mezi kříži na skle žlabu. Následně byly veškeré obrazy ořezány dle zadaných hranic.



Obr. 13 – Barevný model stupně šedi

Poté již začala vlastní analýza, byl načten první ořezaný snímek a v každém pixelu snímku byla porovnána hodnota světlosti s dvěma mezními hodnotami. Mezní hodnoty světlosti označovaly rozsah světlosti pozadí. Příklad mezních hodnot je zobrazen na obrázku 14, pokud se hodnota světlosti daného pixelu nacházela v rozmezí 90 až 30, byl pixel zařazen jako pozadí, tj. čistá voda bez částic. Pokud byla hodnota světlosti větší než 90 – pixel obsahující bílou částici, pokud hodnota světlosti byla nižší než 30 – pixel obsahuje černou částici.

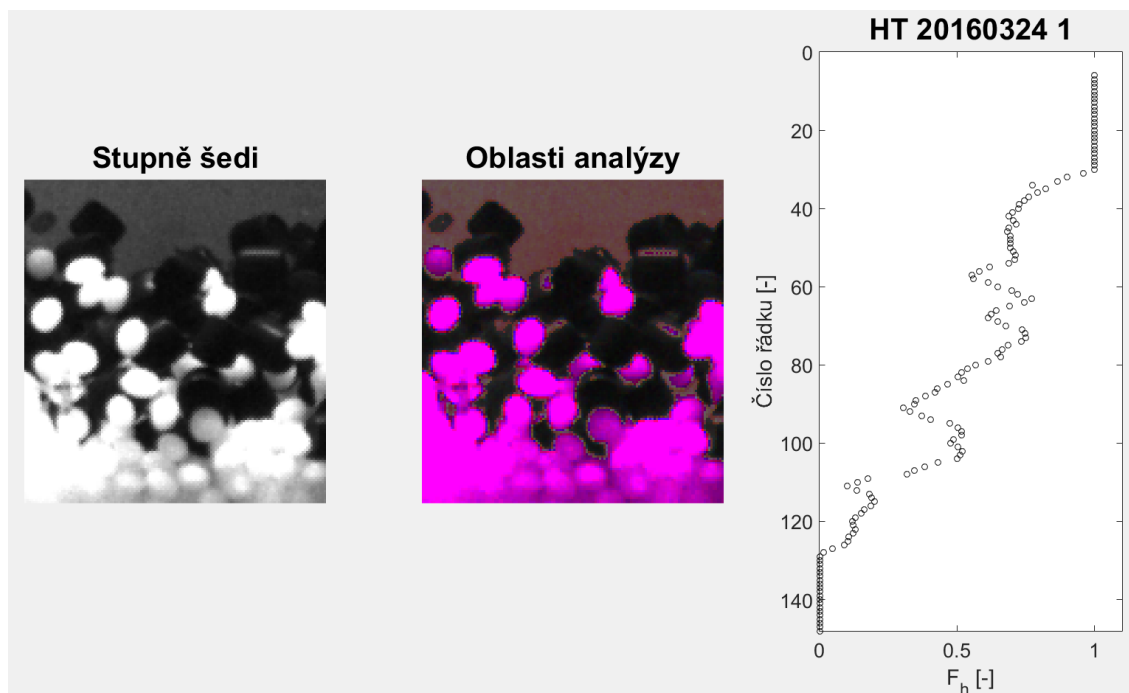


Obr. 14 – Příklad typických rozsahů světlosti

V každém řádku snímku byl spočítán aktuální poměr hrubé frakce F_h jako:

$$F_h = \frac{\text{počet černých pixelů}}{\text{počet černých pixelů} + \text{počet bílých pixelů}} \quad [-] \quad (6-1)$$

Pro každý snímek byl vypočítán průběh aktuálního poměru hrubé frakce po výšce v transportované dvousložkové směsi. Pro ilustraci je na obrázku 15 zobrazeno typické výpočetní okno skriptu. V levé části se nachází výřez ve stupních šedi. Ve střední části je výřez barevně rozdělený na 3 oblasti: černá – hrubá frakce, fialová – jemná frakce, červená – čistá voda. V pravé části se nachází graf znázorňující průběh aktuálního poměru hrubé frakce po výšce s vertikálním rozlišením po jednom pixelu.



Obr. 15 – Schéma typického průběhu výpočtu pro jeden snímek

Tato procedura byla provedena pro každý snímek ze záznamu. Výsledný průběh průměrné koncentrace hrubé frakce po výšce byl získán jako průměr z dílčích snímků. Výsledná hodnota v každém pixelovém řádku byla získána jako aritmetický průměr hodnot ze všech snímků. Výsledný graf je zobrazen na obrázku 16, kromě průměrné hodnoty hrubé frakce po výšce je zde také zobrazen vložený odvozený koncentrační profil (dle kapitoly 2.2.4) a proložený rychlostní profil.

Rychlostní a koncentrační profil bylo nutné správně sesadit s vypočítaným průběhem průměrné hodnoty hrubé frakce po výšce, neboť rychlostní profil a výška transportní vrstvy (určená při měření) byly měřeny cca 1 metr po proudu od místa pořízení videozáznamů, výška transportní vrstvy se v místě pořízení videozáznamu mohla mírně lišit. Výška transportní vrstvy byla pro potřeby analýzy zjištěna z videozáznamu a její hodnota byla odečtena na měřítku, které bylo zaznamenáno na levém okraji videozáznamu. Rozdíly výšek transportních vrstev nebyly velké a jejich porovnání je dále zobrazeno v následující kapitole.

Koncentrační profil byl vždy vložen na vrchol sedliny, určené z videozáznamu, v nezměněné podobě, tj. v podobě v jaké byl odvozen dle rychlostního profilu a celkového průtoku splavenin (viz kapitola 2.2.4). Pokud byla výška transportní vrstvy určena dle videozáznamu větší než výška transportní vrstvy určená vizuálně při měření na sklopném žlabu, koncentrační profil nedosahoval až na vrchol transportní vrstvy. Pokud byla výška

transportní vrstvy určená dle videozáznamu menší, koncentrační profil byl na svém vrcholu oříznut a na vrcholu transportní vrstvy nebyla koncentrace rovná nule.

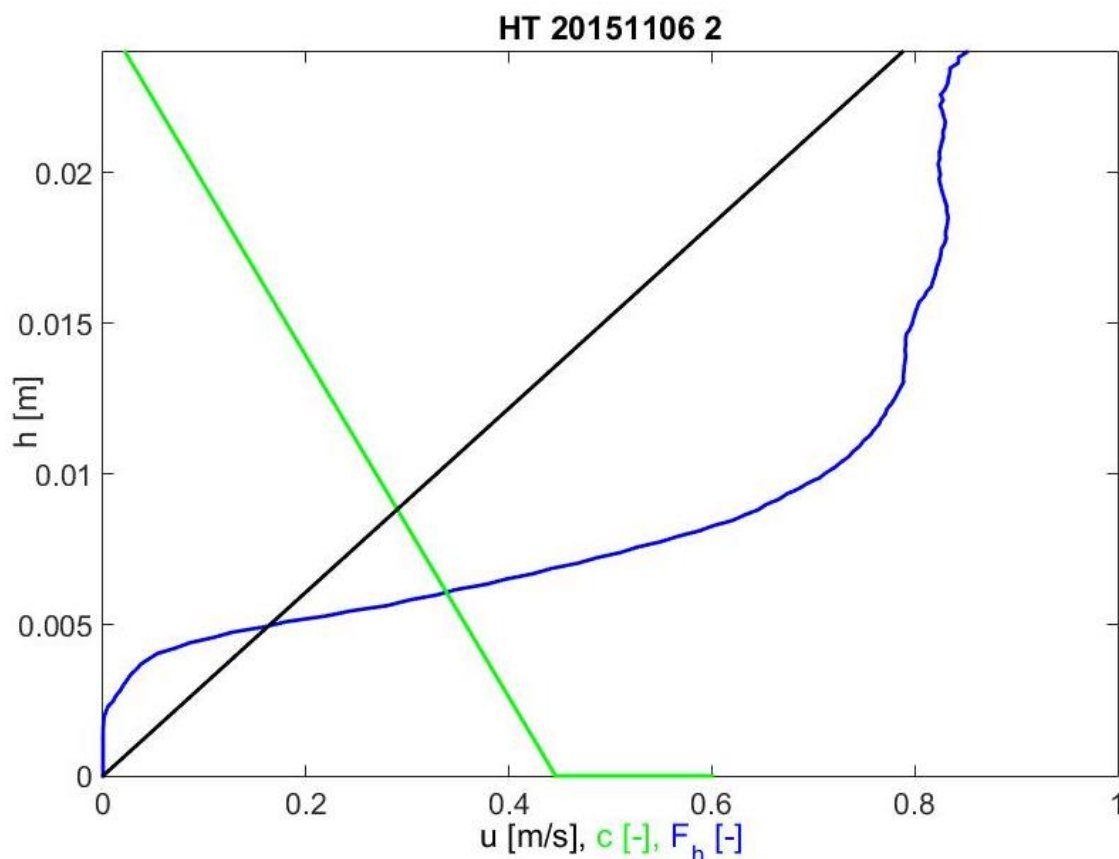
Rychlostní profil byl vždy vložen na vrchol sedliny, určené z videozáznamu, v nezměněné podobě. Následně byl oříznut dle výšky transportní vrstvy určené z videozáznamu. Takto sesazené profily byly dále použity pro výpočet celkového poměru jemné frakce v transportované dvousložkové směsi $F_{j,celk}$.

Následně byl vypočítán celkový průtok hrubých částic Q_h a celkový průtok částic Q_s :

$$Q_h = \int_0^{h_i} u \cdot c \cdot F_h \cdot b \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (6-2)$$

$$Q_s = \int_0^{h_i} u \cdot c \cdot b \left[\frac{m^3}{s} \right] \quad (6-3)$$

Kde b je šířka žlabu. Nakonec je možné určit celkový poměr hrubé frakce $F_{h,celk}$ a celkový poměr jemné frakce $F_{j,celk}$ v transportované dvousložkové směsi pomocí vztahů 4-1 a 4-2. Tyto hodnoty je možné porovnat s výsledky získanými ze vzorku odebraného při pokusu.



Obr. 16 – Výsledná průměrná hodnota poměru hrubé frakce po výšce proudění

6.2 Pokusy vybrané pro analýzu videozáznamu

Celkově bylo se směsí „HT“ provedeno 49 rozlišných pokusů za podmínek horního režimu pohybu splavenin nad plochým dnem, k dispozici bylo tudíž 49 záznamů proudění. Ze všech záznamů bylo vybráno 24 vhodných záznamů, které se po vizuální kontrole zdály přijatelné k samotné analýze. Zbývajících 25 záznamů bylo vyřazeno, protože obsahovaly jednu nebo více dále uvedených chyb – náklon kamery (záznam byl natočen šikmo – tj. špatná výška transportní vrstvy), ostrost (záznam byl značně rozostřený a nebylo možné identifikovat vlastní částice a odečíst výšku transportní vrstvy), světelné podmínky (záznam byl příliš tmavý – nebylo možné rozeznat černé částice od pozadí, nebo příliš světlý – světlé částice splývaly s pozadím). Třídění záznamů bylo provedeno subjektivně, pokud záznam nevypadal vizuálně přijatelně, byl vyřazen. V následující práci je dále uvažováno pouze 24 vybraných záznamů.

6.3 Citlivostní analýza volby mezních hodnot

Pro každý experiment vybraný k analýze bylo nutné zvolit hranice analyzované oblasti na snímku a mezní hodnoty světlosti bílých a černých částic. V této podkapitole jsou popsány a zobrazeny citlivosti celkového transportovaného poměru jemné frakce $F_{j,celk}$ v závislosti na volbě mezních hodnot.

Výsledky citlivostní analýzy jsou prezentovány pomocí absolutního rozdílu $r_{abs,citlivost}$ a relativního rozdílu $r_{rel,citlivost}$, které byly vypočítány dle následujících vztahů porovnávajících celkový vypočtený poměr jemné frakce v transportované směsi:

$$r_{abs,citlivost} = F_{j,celk(skript,citlivost)} - F_{j,celk(skript)} \quad [\%] \quad (6-4)$$

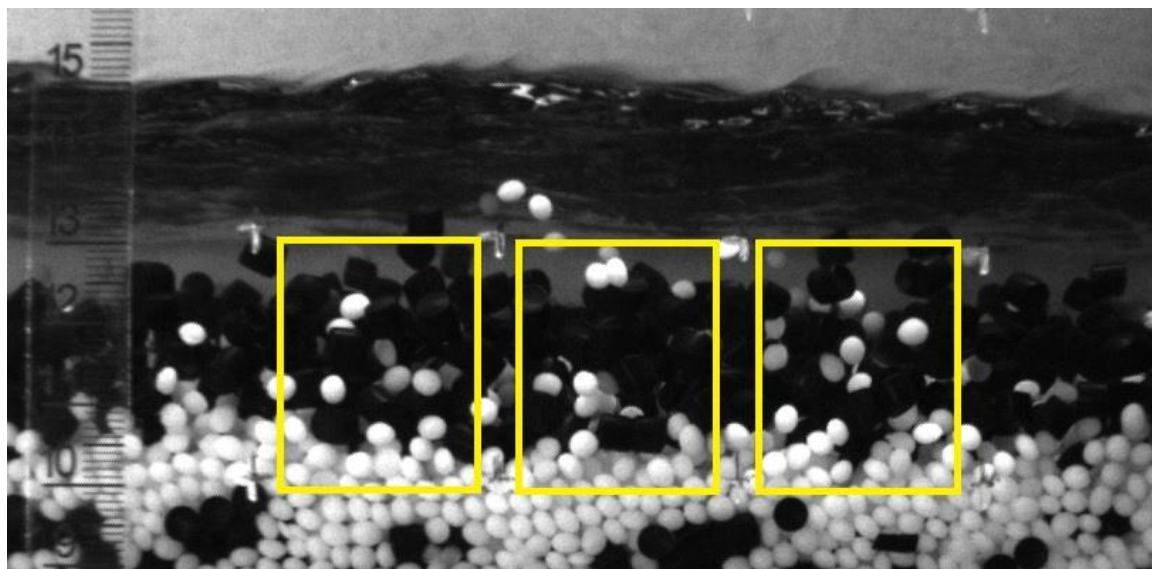
$$r_{rel,citlivost} = \frac{F_{j,celk(skript,citlivost)} - F_{j,celk(skript)}}{F_{j,celk(skript)}} \cdot 100\% \quad [\%] \quad (6-5)$$

Kde $F_{j,celk(skript,citlivost)}$ je hodnota celkového vypočteného poměru jemné frakce na základě změřených vstupních hodnot citlivostní analýzy.

6.3.1 Poloha analyzovaného okna

Prvním analyzovaným prvkem byla poloha analyzovaného výřezu na snímku videozáznamu. Celkem byly porovnány 3 možné oblasti, které jsou schematicky zobrazeny na obrázku 17. Jednotlivé oblasti jsou odděleny kříži nakreslenými na stěně žlabu. Ze

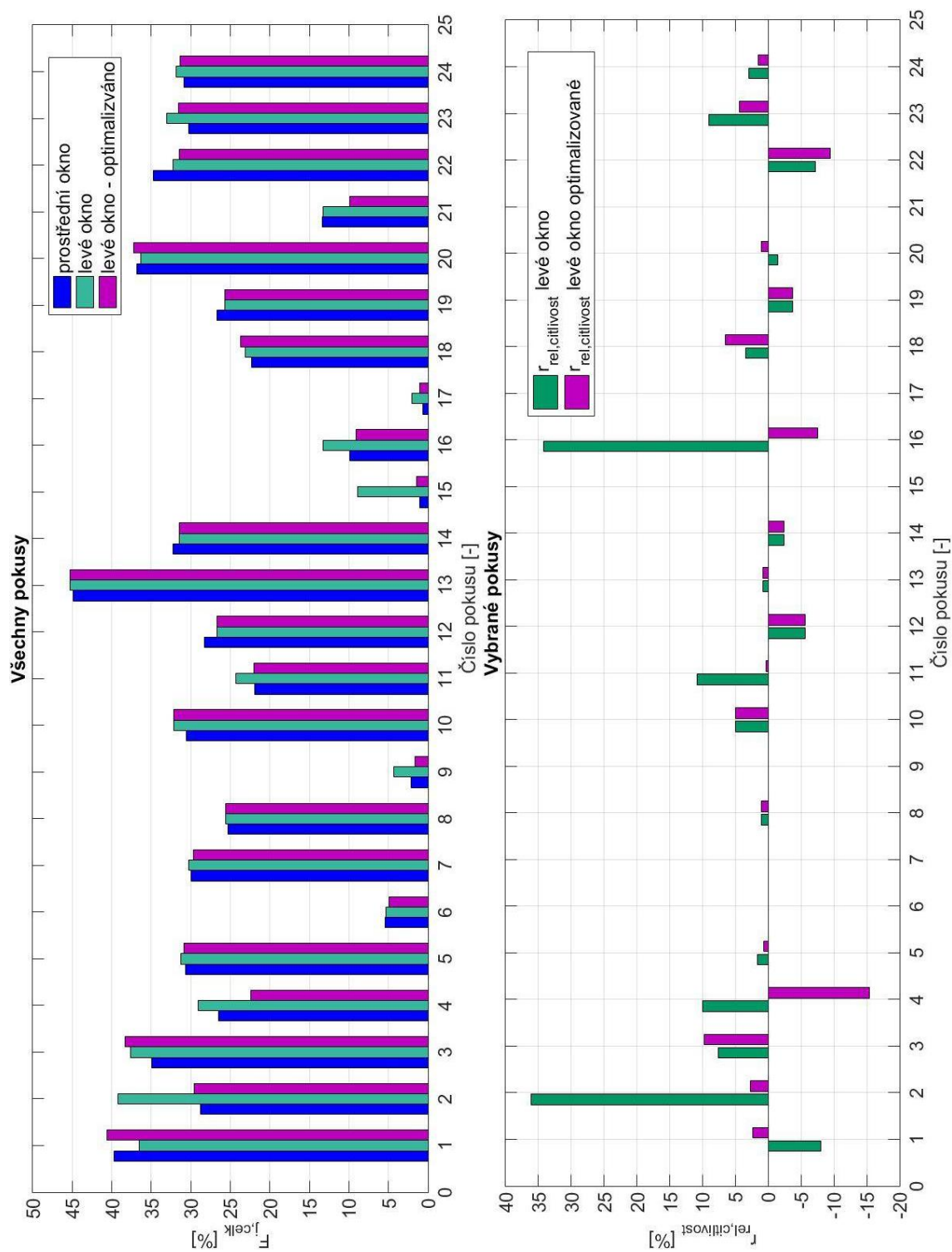
schématu 3 oblastí lze pouhým okem vypořádat rozdílné světelné intenzity v různých oblastech, převážně v pravé části snímku již není osvětlení dostatečné.



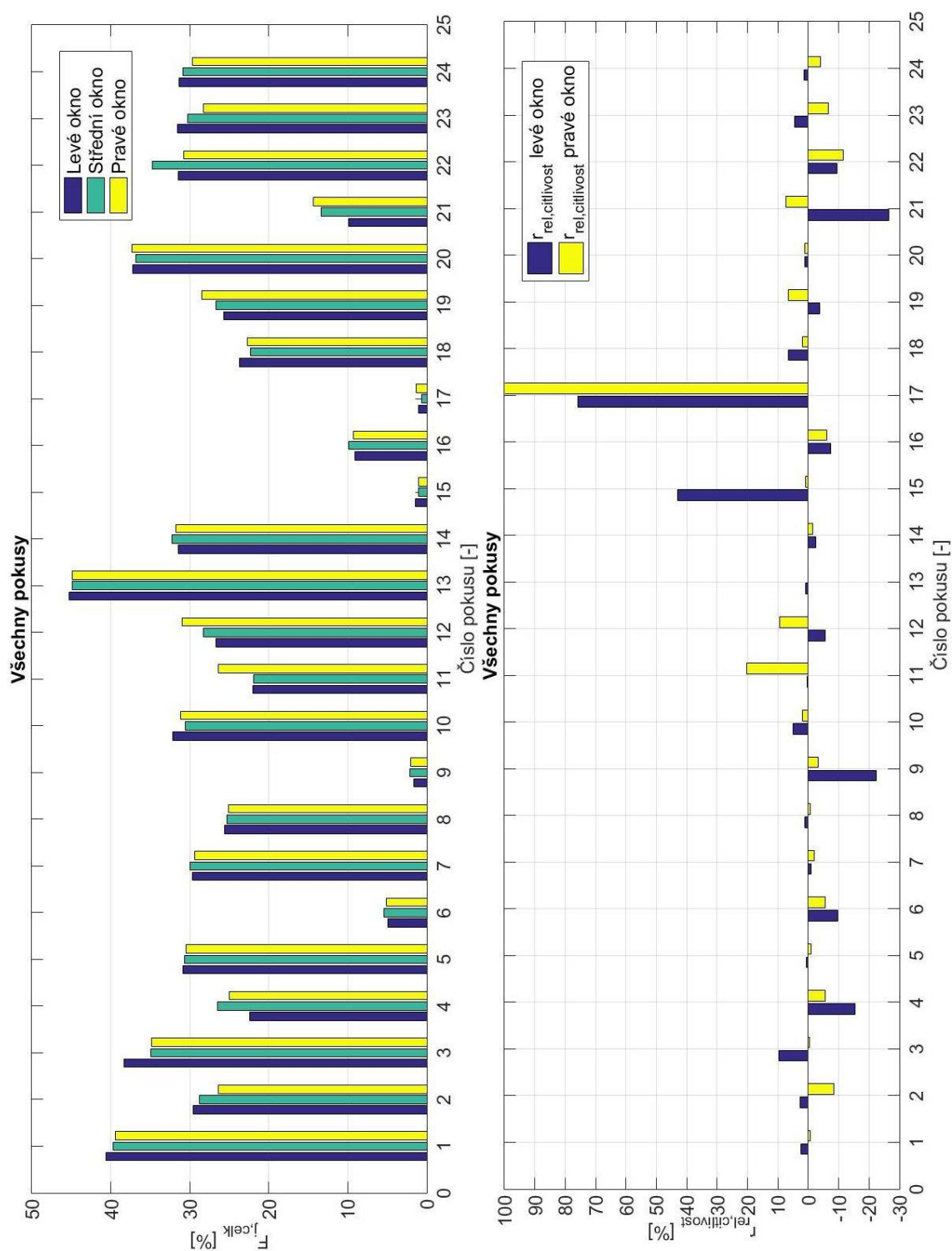
Obr. 17 – Poloha analyzovaných oken

V prvním kroku bylo provedeno srovnání středního okna s levým. Do výpočtu celkového poměru jemné frakce v levém okně byly dosazeny mezní hodnoty světlosti zjištěné v prostředním okně. Výsledek je zobrazen na obrázku 18, relativní rozdíl zjištěný dle vztahu 6-5 dosahoval pro některé pokusy až 35% (záměrně byly vynechány pokusy s celkovým poměrem jemné frakce cca pod 15%, kde relativní rozdíly dosahovaly hodnot stovek procent). Pro levé i pravé okno bylo nutné zvolit vlastní optimální hodnoty mezních hodnot světlosti, na obrázku 18 jsou také zobrazeny výsledky pro optimalizované hodnoty a je z nich patrné, že relativní rozdíly byly výrazně sníženy.

Porovnání výsledků levého a pravého okna se středním výpočetním oknem je zobrazeno na obrázku 19, z porovnání je patrné, že největších relativních rozdílů je dosahováno pro stavy s hodnotou celkového poměru jemné frakce do cca 15%. Pokud zanedbáme tyto stavy, maximální relativní rozdíl je cca 10% a pro více než polovinu pokusů dokonce menší než 5%. Z toho je patrné, že poloha výpočtového okna zásadně neovlivňuje výsledky, za předpokladu stejného osvětlení analyzovaných oblastí.



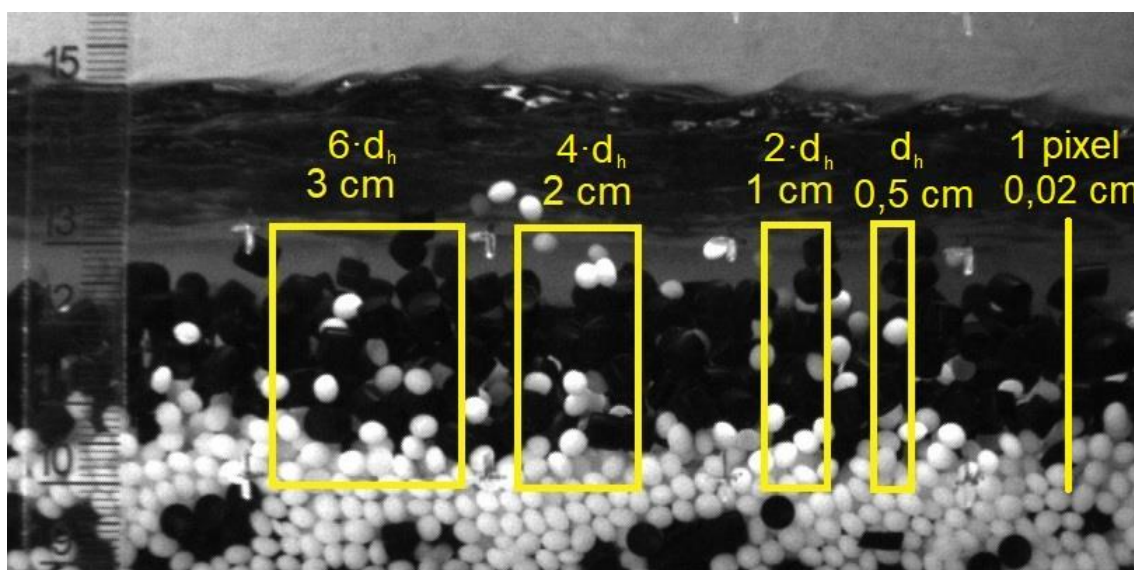
Obr. 18 – Porovnání celkového poměru jemné frakce v levém a středním okně



Obr. 19 – Porovnání výsledků levého a pravého okna se středním výpočetním oknem

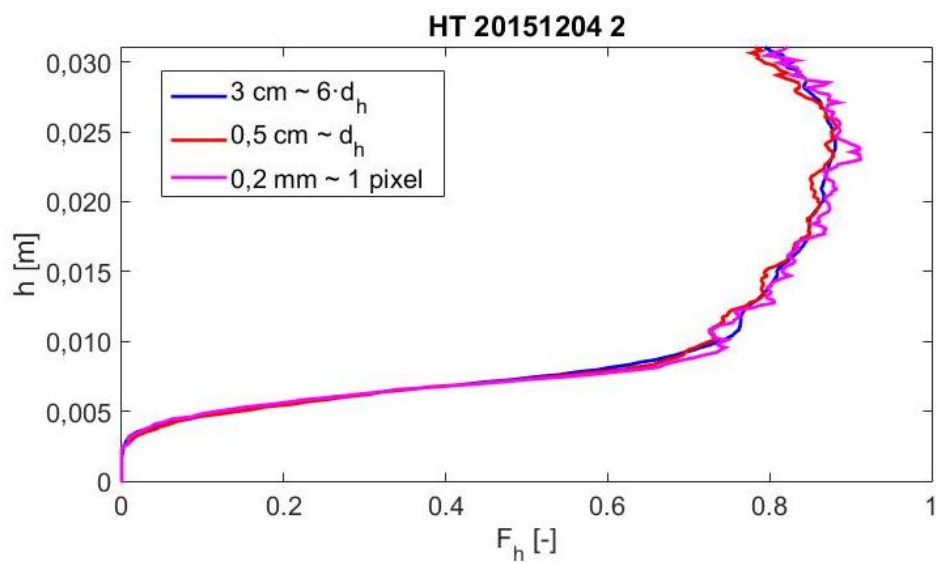
6.3.2 Šířka analyzovaného okna

Další zkoumanou položkou byla šířka analyzovaného okna. Standardně byla uvažována šířka okna cca 3 cm (šířka odpovídající hodnotě cca $6 \times d_h$). Větší hodnota nebyla možná z důvodu značek na skleněné stěně žlabu. Pro účely citlivostní analýzy byly vypočítány hodnoty celkového poměru jemné frakce v transportované směsi pro okna šířky 2 cm ($4 \times d_h$), 1 cm ($2 \times d_h$), 0.5 cm (d_h) a nejmenší možná hodnota šířky okna – 1 pixel (schematicky viz obrázek 20). Citlivostní analýza proběhla pouze v prostředním okně (viz obrázek 17), v krajních oknech lze předpokládat obdobné výsledky.

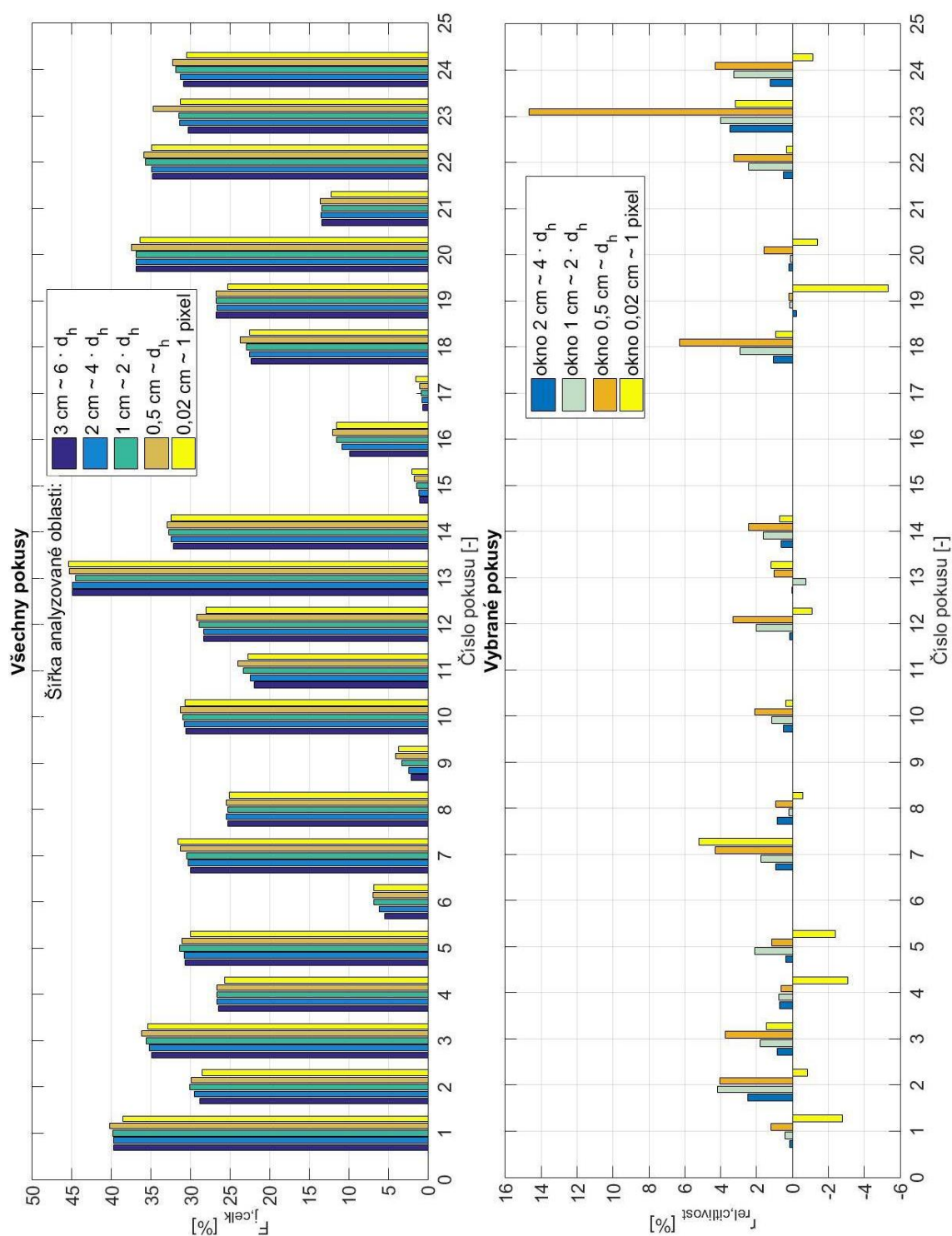


Obr. 20 – Šířky analyzovaných oken

Výsledky citlivostní analýzy jsou zobrazeny na obrázku 22. Absolutní rozdíly výsledků pro různé šířky oken jsou maximálně cca 3% (vyjma ojedinělé hodnoty 5%). Pokud nebereme v potaz pokusy, kde hodnota $F_{j,celk}$ byla nižší než cca 15%, relativní rozdíly jsou maximálně cca 6% (vyjma ojedinělé hodnoty 15%). Hodnota $F_{j,celk}$ vychází pro různé šířky analyzovaného okna velice podobně, ovšem průběh F_h po výšce nevychází pro úzká analyzovaná okna spojitě jako pro široká okna. Na obrázku 21 je zobrazen průběh F_h po výšce pro analyzovanou šířku okna 3 cm, 0.5 cm a 1 pixel. Z grafu je patrné, že není optimální používat pro analýzu úzká okna, neboť průběh F_h nemá očekávaný spojitý charakter. Lze očekávat, že pro dostatečně dlouhý záznam s vysokou frekvencí snímání, by vycházel spojitý průběh F_h i pro okno o šířce 1 pixel.



Obr. 21 – Průběh poměru hrubé frakce po výšce



Obr. 22 – Porovnání výsledků pro různé šířky analyzované oblasti

6.3.3 Výška transportní vrstvy

Prvním krokem před citlivostní analýzou $F_{j,celk}$ na změnu výšky transportní vrstvy, bylo porovnání výšek transportních vrstev odečtených vizuálně při pokusu a vizuálně odečtených z videozáznamů. Porovnání je zobrazeno na obrázku 24. Z grafu je patrné, že většina výšek odečtených z videozáznamu se liší maximálně o ± 3 mm (cca polovina výšky větší částice). Na obrázku 24 je také zobrazen relativní procentuální rozdíl výšek transportních vrstev ρ_h definovaný jako:

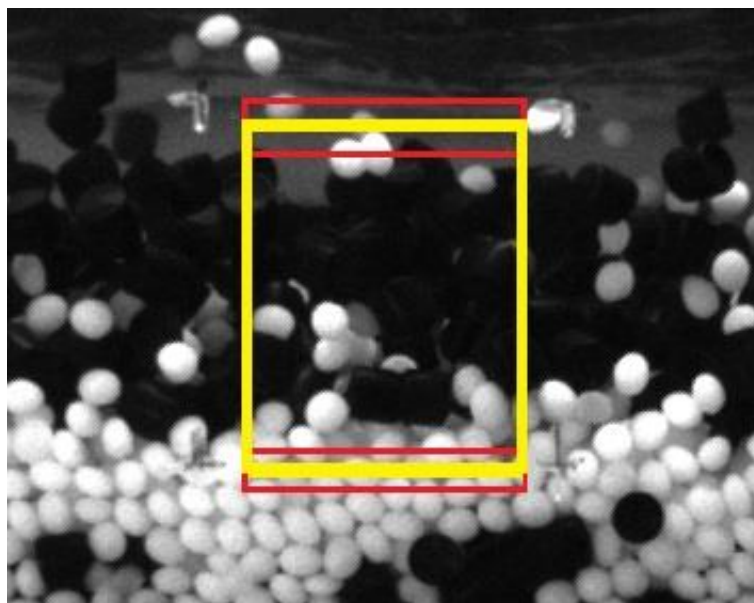
$$\rho_h = \left(\frac{h_{t,video}}{h_{t,vizuál}} - 1 \right) \cdot 100 \% [\%] \quad (6-6)$$

Z grafu je patrné, že polovina výšek se liší maximálně o 5%. Pouze u čtyř pokusů je rozdíl výšek transportních vrstev větší než 10 %. Větší rozdíl může být způsoben natočením kamery vůči proudění a měřítku (snímání na šikmo, místo kolmého snímání), délkou záznamu (v záznamu se mohla objevit zvýšená lokální vlna proudění s větší koncentrací částic), „chybou odečtu - subjektivita“ (výška je odečítána vizuálně). Celkově lze hodnotit rozdíly výšek transportních vrstev jako uspokojivé, neboť většina výšek se liší maximálně o polovinu výšky větší částice TLT50.

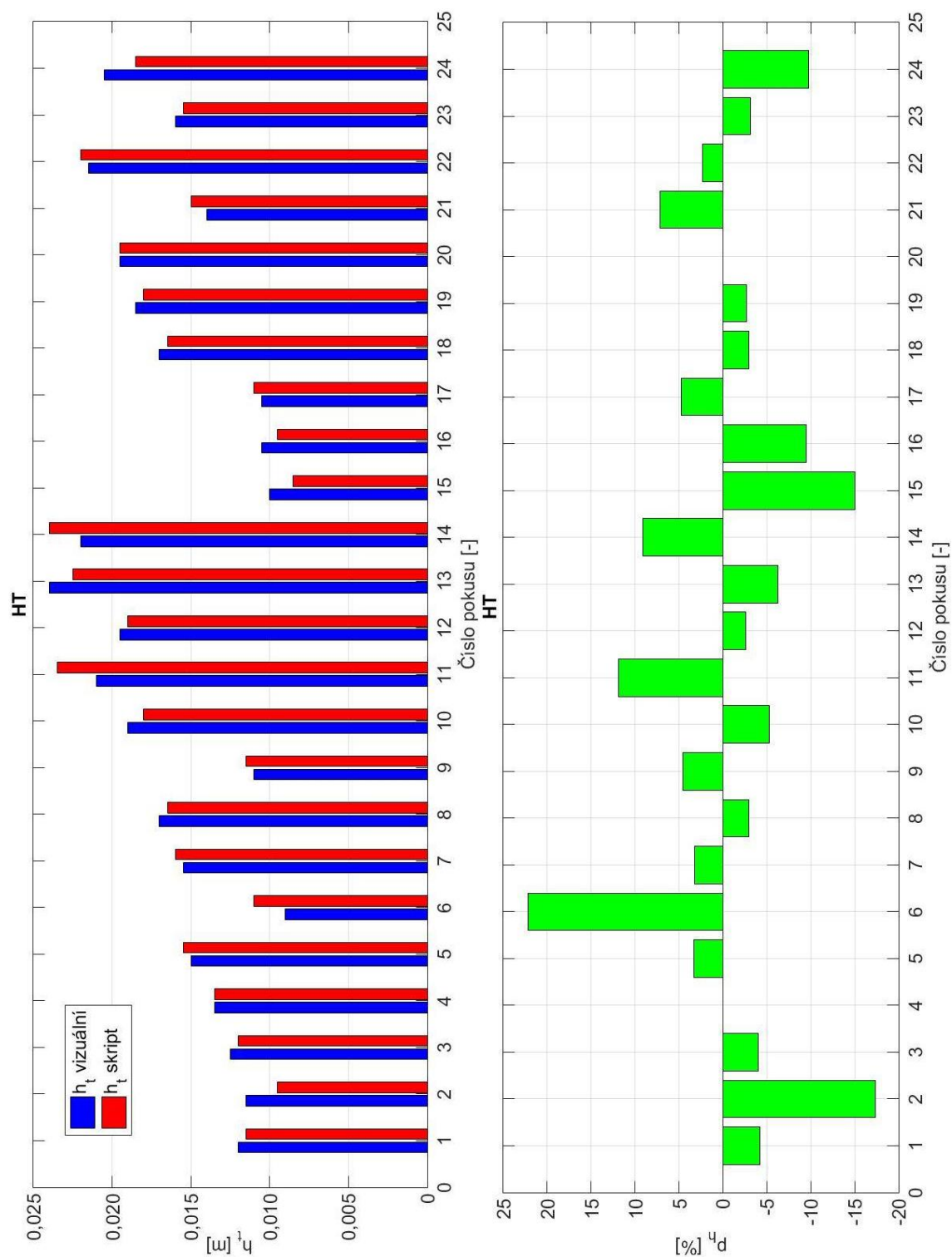
Z výše uvedeného porovnání výšek vyplynula vhodná mez pro citlivostní analýzu – polovina výšky částice. Pro zjištění míry citlivosti $F_{j,celk}$ na změnu výšky transportní vrstvy byly provedeny výpočty, při kterých byla transportní vrstva zvětšena či zmenšena o polovinu výšky částice. Na spodním okraji byla její velikost měněna o 1.5 mm (cca polovina výšky částice HSF3) a na horním okraji o 2.5 mm (cca polovina výšky částice TLT50). Schéma změn analyzovaného okna je zobrazena na obrázku 23, žlutě je zobrazeno optimální okno, červeně jsou zobrazeny jednotlivé změny výšky analyzovaného okna.

Výsledky vlastní analýzy jsou zobrazeny na obrázku 25. Z výsledků byly odebrány relativní rozdíly pro pokusy s hodnotou $F_{j,celk}$ nižší než cca 15%, neboť jejich rozdíly byly i více než 50% a zhoršily by celkovou čitelnost výsledků citlivostní analýzy. Z výsledků je patrné, že nejdůležitější je správné odečtení polohy sedliny, tj. spodního okraje transportní vrstvy. Pokud je spodní okraj transportní vrstvy odečten o polovinu výšky částice jinak, relativní rozdíl vypočítaných hodnot $F_{j,celk}$ může dosahovat až 15%. Naopak pokud je určen horní okraj transportní vrstvy o polovinu částice jinak, relativní rozdíly vypočítaných hodnot $F_{j,celk}$ jsou pro velkou většinu pokusů prakticky zanedbatelné.

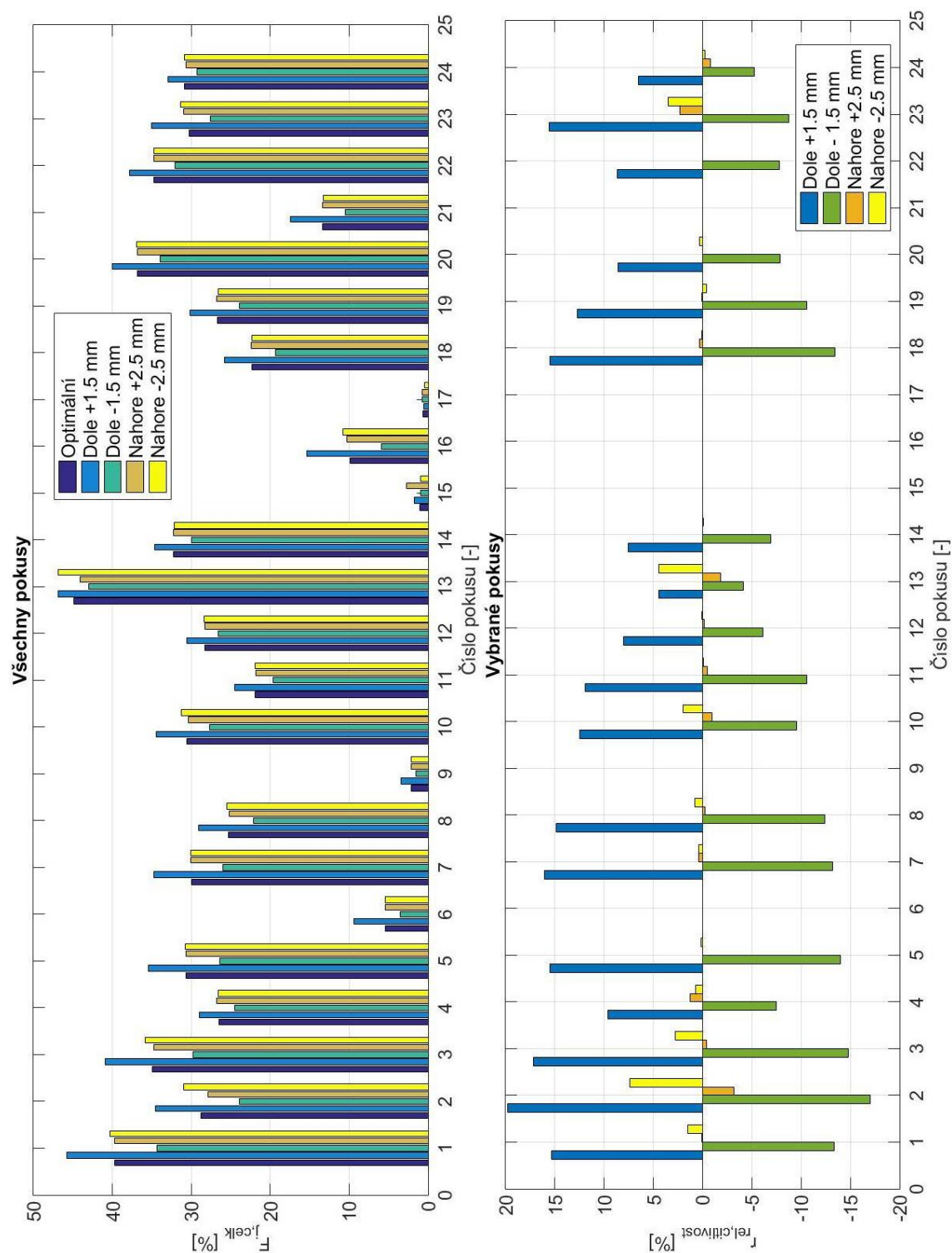
Tyto výsledky jsou logické, neboť na dolní hranici transportní vrstvy se nachází kluzná vrstva, která je tvořena pouze jemnými částicemi a její spodní část je v klidu bez pohybu částic. Pokud je dolní hranice transportní vrstvy posunuta směrem dolů, logicky se tedy zvýší hodnota $F_{j,celk}$. Pokud je dolní hranice posunuta směrem nahoru, dojde ke snížení hodnoty $F_{j,celk}$. Při změnách horního okraje transportní vrstvy dochází pouze k malým změnám, neboť v horní části transportní vrstvy je přepravován pouze malý zlomek sedimentu. Případně pokud je výška transportní vrstvy větší než výška, pro niž byl odvozen koncentrační profil, zvětšení výšky transportní vrstvy nemá žádný vliv na hodnotu $F_{j,celk}$.



Obr. 23 – Schéma změn rozsahu výšky transportní vrstvy



Obr. 24 – Porovnání výšek transportní vrstvy



Obr. 25 – Porovnání výsledků pro různé výšky transportní vrstvy

Legenda: Název „Dno +1.5 mm“ značí rozšíření transportní vrstvy odečtené z videozáznamu o 1.5 mm u dna, název „Nahore +2.5 mm“ značí rozšíření transportní vrstvy odečtené z videozáznamu o 2.5 mm u vrcholu transportní vrstvy.

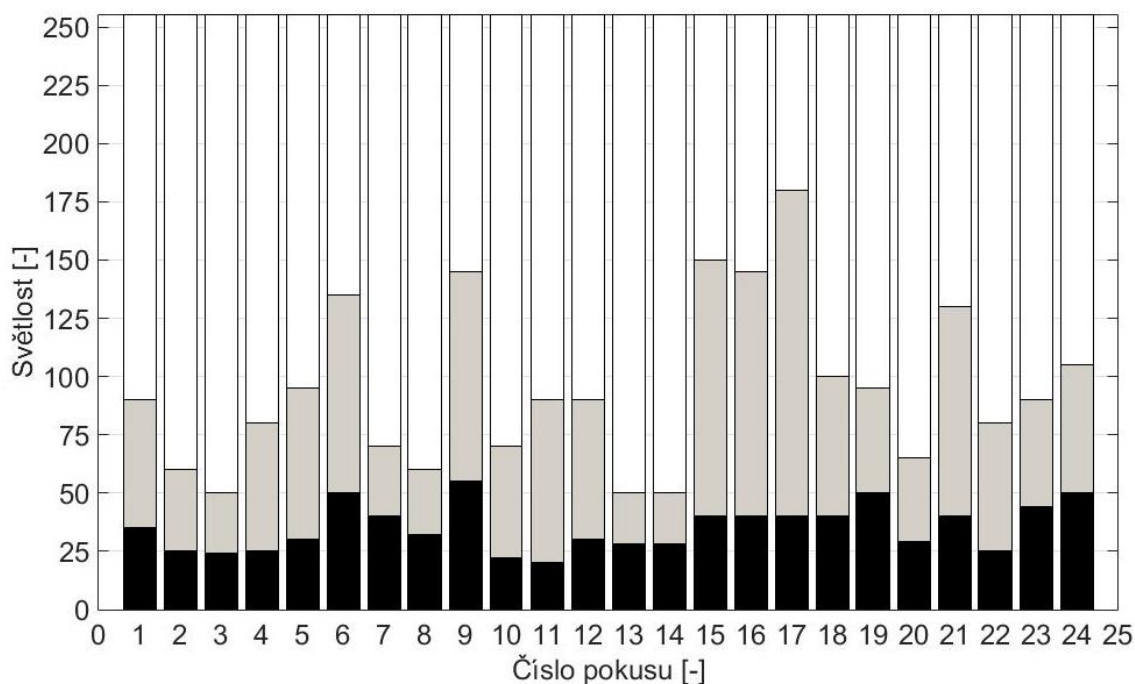
6.3.4 Mezní hodnoty světlosti

Veškeré experimenty probíhaly ve vodohospodářské hale, kam proudí denní světlo, tudíž jsou světelné podmínky každého experimentu jiné. Pro každý experiment bylo nutné zvolit vlastní mezní hodnoty světlosti bílých a černých částic (tj. hodnoty světlosti ohraničující min. a max. rozsah pozadí – viz obrázek 14). V tabulce 3 jsou zobrazeny minimální a maximální hodnoty světlosti ohraničující pozadí a celkového rozsahu světlosti pozadí. Citlivostní analýza mezních hodnot světlosti byla z důvodů velké časové náročnosti prováděna pouze pro prostřední okno analyzované oblasti. V krajních oknech lze nejspíše očekávat obdobné výsledky.

Tabulka 3 – Rozsah světlosti pozadí

	Dolní hodnota světlosti pozadí	Horní hodnota světlosti pozadí	Rozsah světlosti pozadí
	[-]	[-]	[-]
min	20	50	22
max	55	180	140
průměr	35	95	60

Na obrázku 26 jsou zobrazeny veškeré určené rozsahy světlostí částic a pozadí. Tyto hodnoty byly určeny na základě analýzy videozáznamu, tak aby skript co nejpřesněji určil body s černou a bílou částicí a zároveň vyřadil z analýzy body s pozadím (tj. čistou vodou). Tato podmínka byla vizuálně kontrolována při výpočtu skriptu ve výpočetním okně zobrazeném na obrázku 15 v prostřední části, kde jsou jednotlivé oblasti barevně odděleny. Z rozsahu světlostí je patrné, maximální hodnota světlosti černých částic je relativně konstantní pro všechny pokusy. Oproti tomu minimální hodnota světlosti bílých částic je velmi proměnná a závislá na světelných podmínkách panujících při pokusu.



Obr. 26 – Rozsahy světlostí všech pokusů

Legenda: Černá barva – hrubá frakce, Šedá barva – pozadí (tj. čistá voda), Bílá barva – jemné frakce

Pro citlivostní analýzu vlivu mezních hodnot světlosti byly zvoleny změny světlosti o 2, 5 a 10 bodů. Změna hranice o 2 body světlosti je velmi malá, záleží na pozorovateli. Změnu hranice o 5 bodů světlosti, lze označit jako limitní, větší rozdíly mezních hodnot lze považovat za chybné. Změna hranice světlosti o 10 bodů je již velká změna a lze ji přirovnat k hrubé chybě při určování mezí analýzy. Pro každý pokus bylo vypočítáno celkem 12 hodnot celkového transportovaného poměru jemné frakce $F_{j,celk}$, které byly porovnány s hodnotou získanou z odebraného vzorku. Vždy byla měněna pouze jedna mez, která byla zmenšena či zvětšena o 2, 5 nebo 10 bodů světlosti (Schéma je naznačeno na obrázku 27).



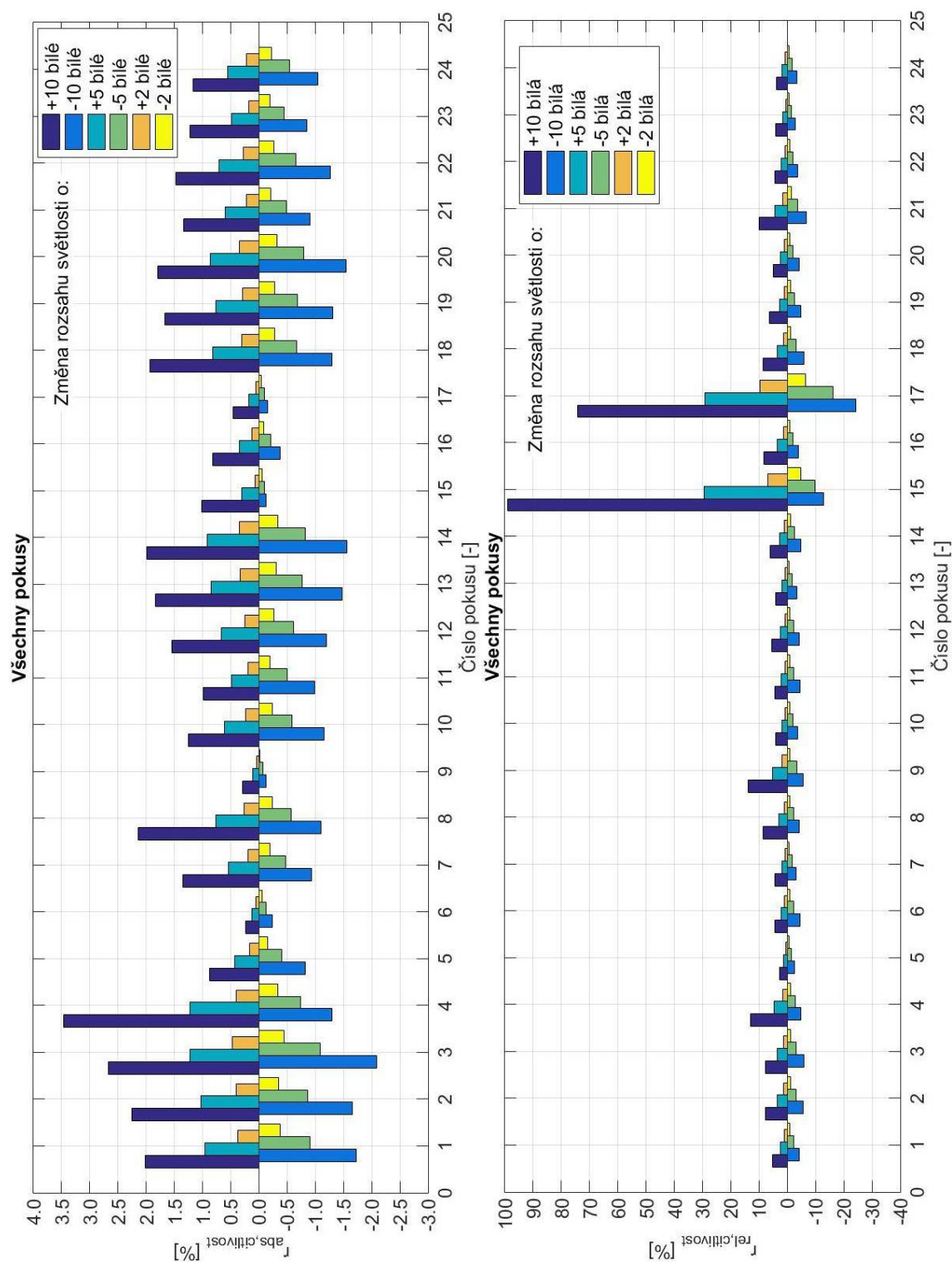
Obr. 27 – Příklad změn rozsahů světlosti pro citlivostní analýzu

Legenda: Červené hodnoty – zvolené optimální hodnoty mezí, Zelené hodnoty – meze posunuté pro citlivostní analýzu o 2, 5 a 10 bodů

Výsledky citlivostní analýzy pro všechny analyzované pokusy jsou zobrazeny na obrázcích 28 a 29. Na obrázku 28 jsou zobrazeny výsledky pro změny rozsahu světlosti bílých jemných částic, absolutní rozdíly jsou v jednotkách procent. Výstižnější je zobrazení

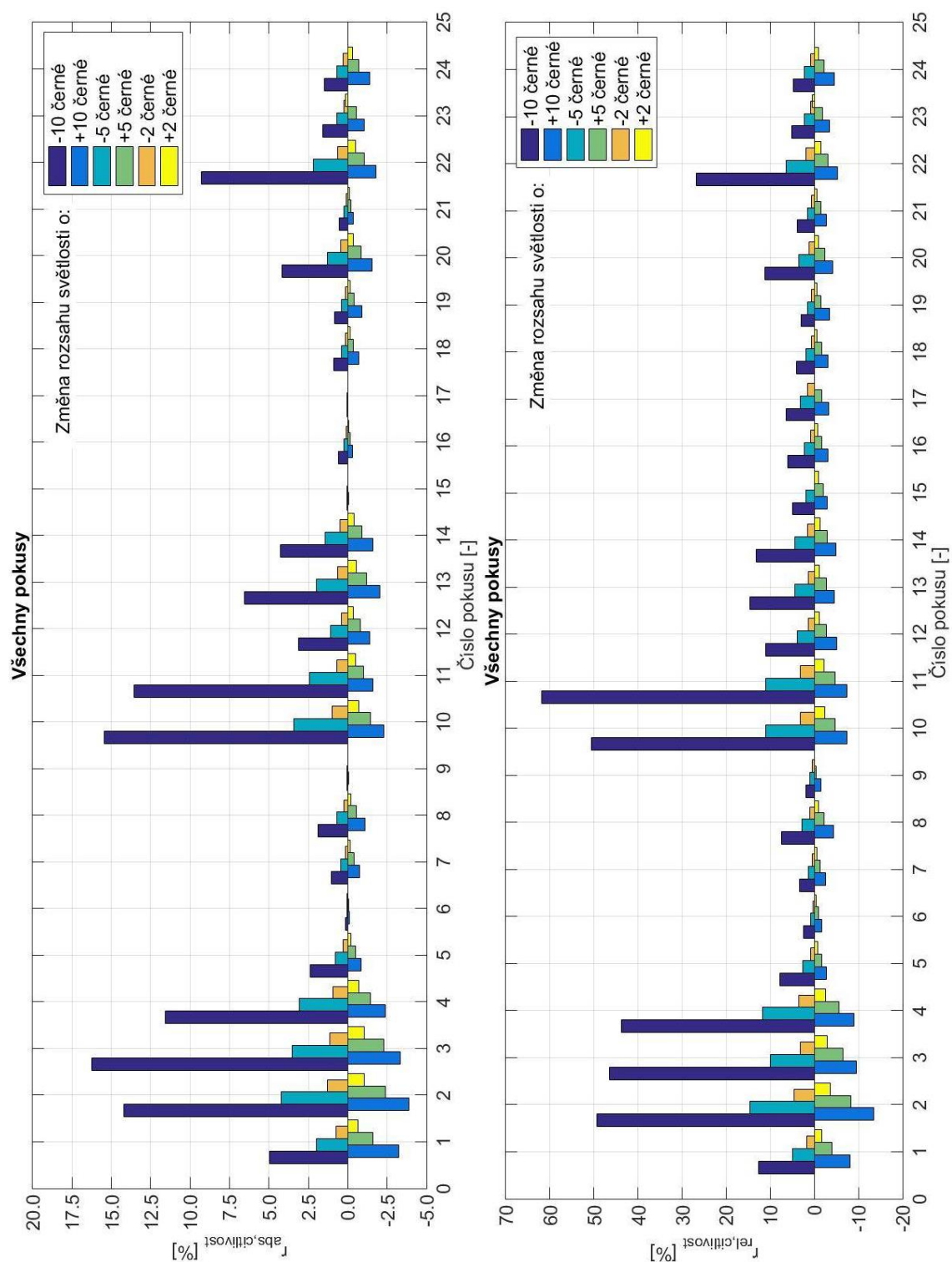
relativních rozdílů – maximální rozdíl je 99% a -24%, to jsou ovšem hodnoty pro stavy s velmi nízkým poměrem jemné frakce v transportované směsi. Pokud jsou tyto dva stavy vynechány maximální relativní rozdíl je 14% a -7%. Při neuvažování hrubých chyb při určování mezí, tj. vyloučení změn hranice o ± 10 bodů světlosti jsou maximální relativní rozdíly +5% a -4%, což lze považovat za velmi kladný výsledek.

Na obrázku 29 jsou zobrazeny výsledky citlivostní analýzy hranice černých částic. Z absolutních rozdílů lze vyzorovat jejich značné zvětšení oproti výsledkům získaných analýzou bílých částic. Tomu korespondují i relativní rozdíly, které pro některé vztahy dosahují až k hodnotám 50%. Pokud ovšem pomineme změny hranic o ± 10 bodů světlosti, maximální relativní rozdíly se sníží na cca 12% a -8%.



Obr. 28 – Výsledky citlivostní analýzy pro změnu rozsahu minimální světlosti hranice bílé částice

Legenda: Změna hranice o +10 bodů světlosti bílé částice znamená posun hranice o 10 bodů světlosti doprava na obrázku 27, tj. mez se posune z hodnoty 95 na 85.



Obr. 29 – Výsledky citlivostní analýzy pro změnu rozsahu maximální světlosti hranice černé částice

Legenda: Změna hranice o -10 bodů světlosti černé částice znamená posun hranice o 10 bodů světlosti doprava na obrázku 27, tj. mez se posune z hodnoty 35 na 25.

6.4 Porovnání výsledků analýzy videozáznamů

Validace metody určování poměru frakcí v transportované dvousložkové směsi analýzou videozáznamu byla provedena srovnáním vypočítané hodnoty celkového poměru jemné frakce ve směsi $F_{j,celk}$ s hodnotou získanou ze síťového rozboru odebraného vzorku. Porovnávána je hodnota vypočítaná v prostředním okně o šířce cca 3 cm, která se dle výše provedené citlivostní analýzy jeví jako neoptimálnější.

Porovnání všech pokusů je zobrazeno na obrázku 31 a 32, z grafů je patrné, že při některých pokusech se hodnota zjištěná z rozboru vzorku velmi výrazně liší od hodnoty zjištěné analýzou videozáznamu. Velký rozdíl mezi metodami byl vždy, pokud hodnota $F_{j,celk}$ byla menší než cca 20%. Stav s hodnotou $F_{j,celk}$ menší než 20% odpovídaly stavům s nízkou hodnotou střední dopravní koncentrace (cca do 3%), typicky se jednalo o stavy, kde výška vrstvy s čistou vodou byla několikanásobně větší než výška transportní vrstvy. Světelný nůž osvětloval částice v těsné blízkosti žlabu. Bílé částice jemné frakce nacházející se dále mimo dosah osvětlení, spadaly díky své nízké hodnotě světlosti do kategorie pozadí (čistá voda), nebo černé částice. Z tohoto důvodu jsou všechny hodnoty $F_{j,celk}$ zjištěné analýzou videozáznamu menší než odpovídající hodnoty $F_{j,celk}$ zjištěné rozbořem odebraného vzorku. U pokusů s intenzivním chodem sedimentu k tomuto problému nedocházelo.

Pokud jsou vyloučeny pokusy, jejichž záznamy obsahovaly typické problémy nebo byla hodnota $F_{j,celk}$ menší než cca 20%, lze spatřit na obrázku 33 poměrně dobrou shodu dat. Typické problémy na záznamech proudění byly světlé odlesky na tmavých částicích (které svou světlostí odpovídaly bílým částicím), různě intenzivně nasvícené částice po výšce (světelný nůž se nacházel na vrcholu žlabu), proudění bez částic, tj. pozadí záznamu, mělo stejný barevný odstín jako bílé nebo černé částice.

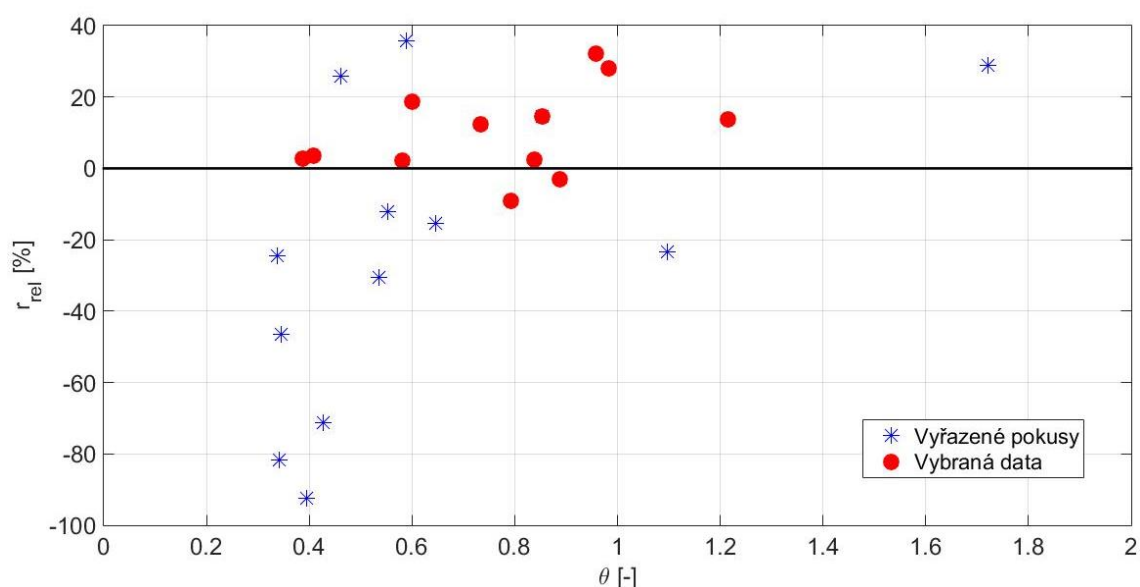
Na obrázku 32 a 33 je zobrazen absolutní rozdíl r_{abs} a relativní rozdíl r_{rel} hodnoty poměru jemné frakce v transportované směsi. Vyjma pokusů 20, 22, 23 a 24 jsou absolutní rozdíly vybraných pokusů menší než 2% poměru frakcí a relativní rozdíly menší než 15% hodnoty získané ze síťového rozboru. Hodnoty absolutního a relativního rozdílu byly získány dle následujících vztahů:

$$r_{abs} = F_{j,celk(skript)} - F_{j,celk(vzorek)} [\%] \quad (6-7)$$

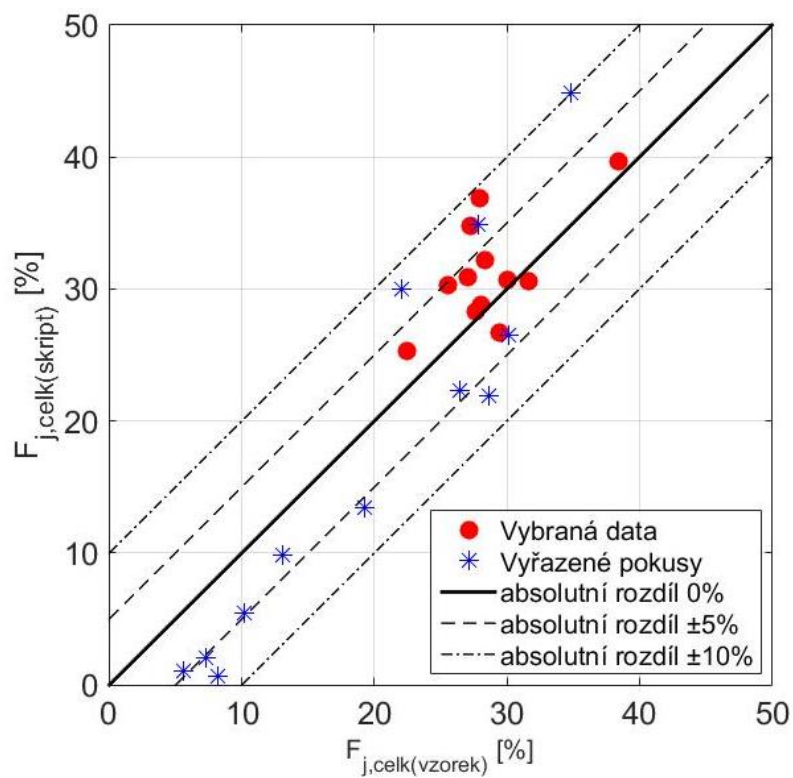
$$r_{rel} = \left(\frac{F_{j,celk(skript)}}{F_{j,celk(vzorek)}} - 1 \right) \cdot 100\% [\%] \quad (6-8)$$

Na obrázku 30 je zobrazen relativní rozdíl poměru jemné frakce vůči Shieldsovu číslu. Z grafu je patrné, že s rostoucím Shieldsovým číslem, tj. s intenzivnějším transportem sedimentu, se zvětšuje i relativní rozdíl poměru jemných frakcí.

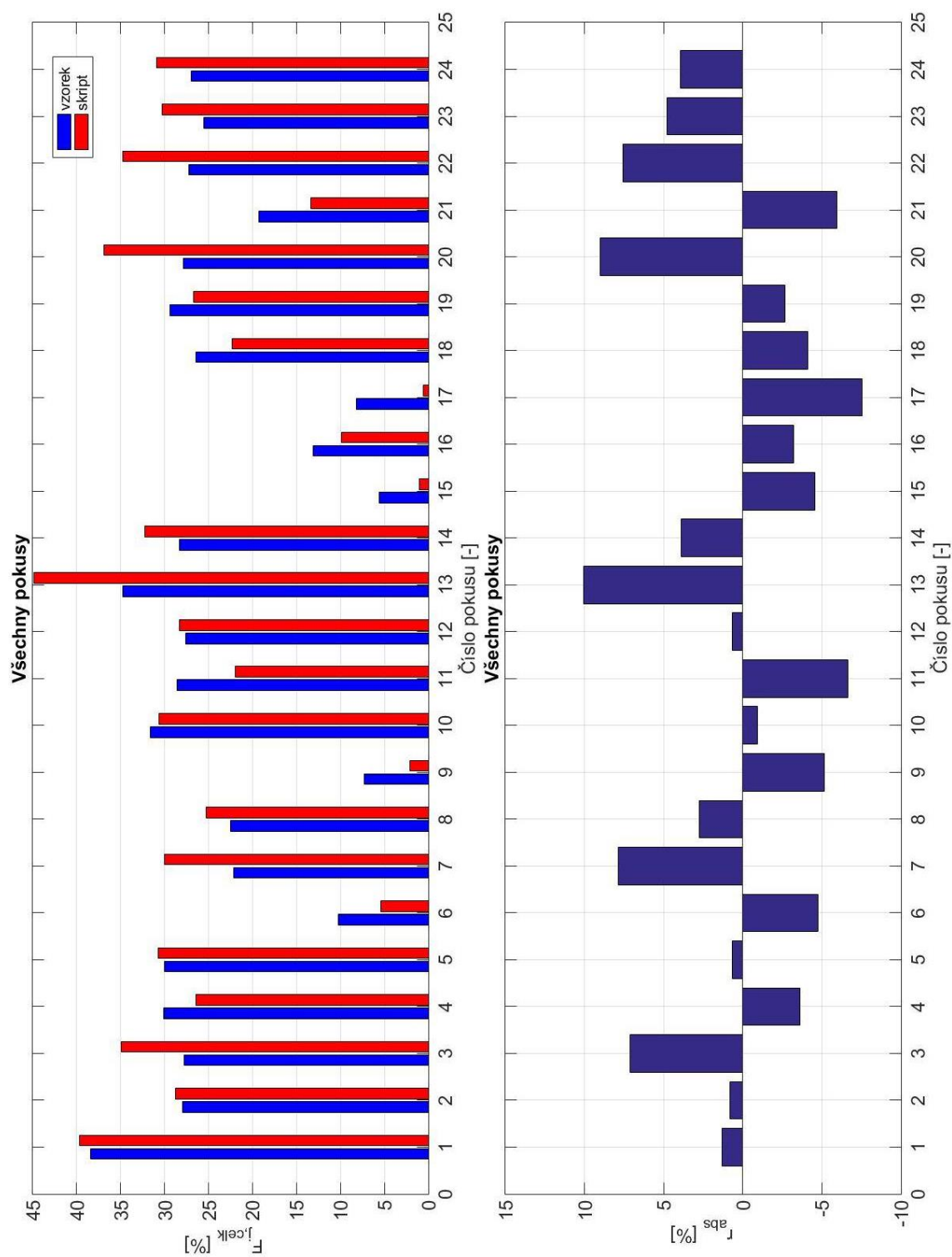
Dle výsledků lze usuzovat, že za předpokladu rovnoměrně nasvíceného proudění, správné volby barvy pozadí, správné volby mezních hodnot a dostatečně dlouhého reprezentativního videozáznamu je možné získat relativně přesnou hodnotu celkového poměru jemné frakce v transportované dvousložkové směsi bez nutnosti odběru vzorku, tj. zásahu do proudění.



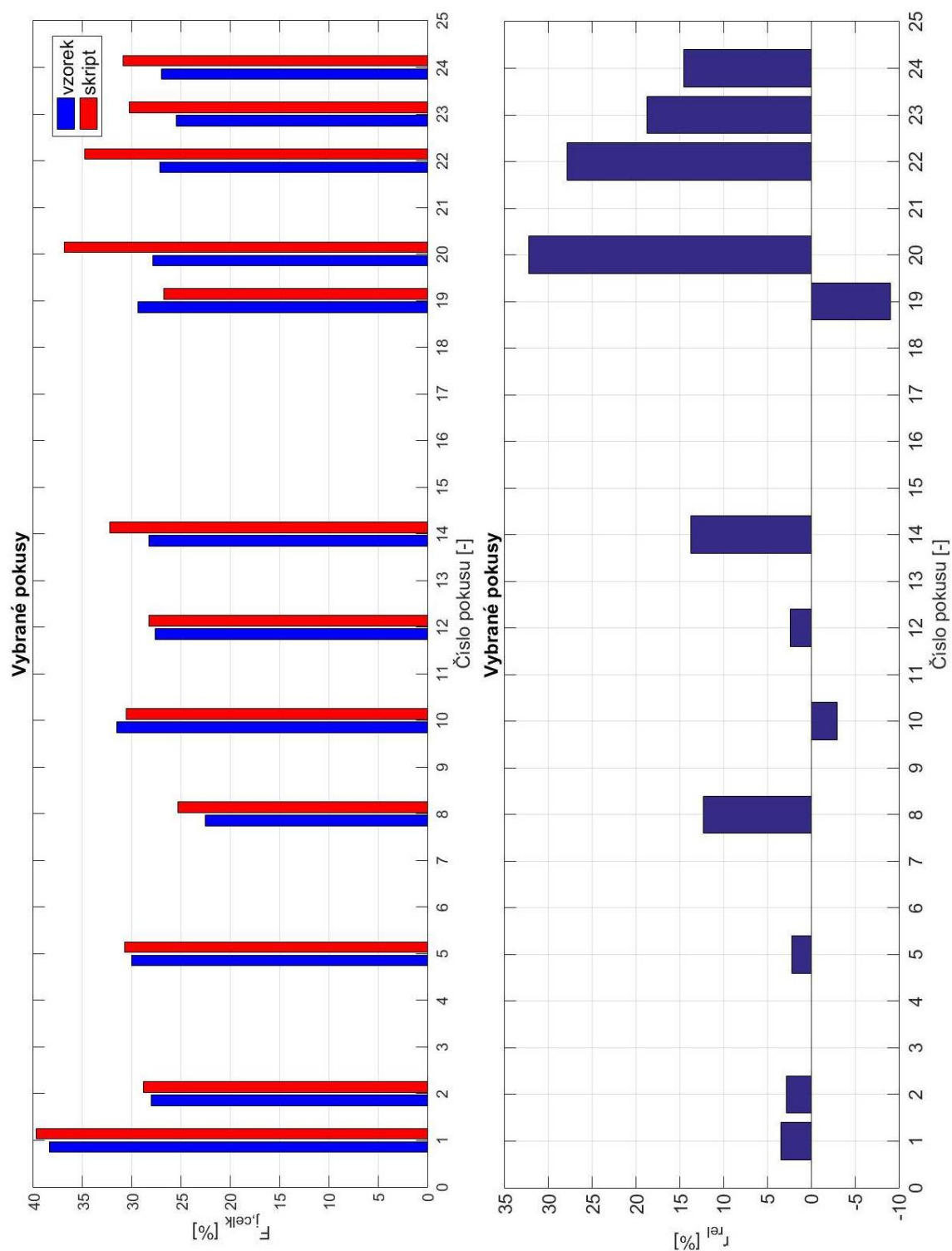
Obr. 30 – Relativní rozdíly poměrů jemné frakce v závislosti na Shieldsově čísle



Obr. 31 – Porovnání metod měření celkového poměru jemné frakce v transportované směsi



Obr. 32 – Porovnání celkových poměrů jemné frakce a jejich absolutních rozdílů



Obr. 33 – Porovnání vybraných celkových poměrů a jejich relativních rozdílů

6.5 Určení možné chyby jednotlivých metod

Pro správné posouzení výsledků $F_{j,celk}$ ze skriptu a z odebraného vzorku je nutné určit či odhadnout možnou chybu obou metod. V následující kapitole jsou nejprve posouzeny výsledky ze vzorků odebraných na konci každého pokusu a následně je odhadnuta možná chyba metody analýzy videozáznamu. Určení možných chyb bylo provedeno pro 24 pokusů, které byly vybrány k analýze pomocí videozáznamu.

6.5.1 Odebíraný vzorek

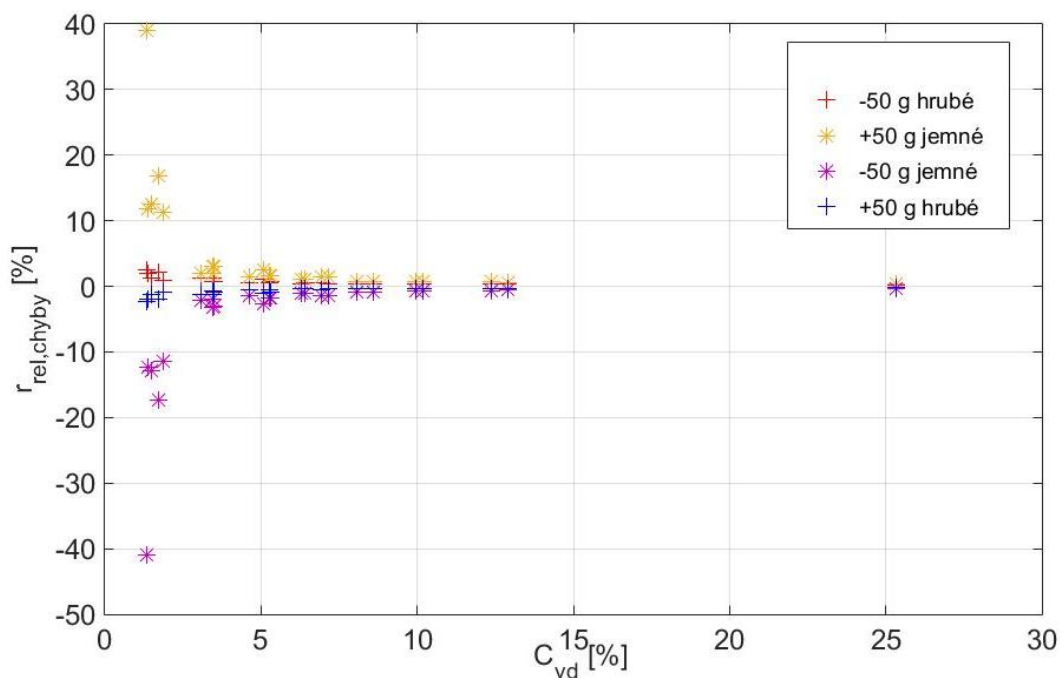
Vlastní metodika a popis vyhodnocení této metody je popsán výše v kapitole 4.3.1. Pro zjištění $F_{j,celk}$ dle vzorce 4-3 je třeba znát pouze hmotnosti jednotlivých frakcí. Pro posouzení citlivosti $F_{j,celk(vzorek)}$ byla do výpočtů zavedena „umělá“ chyba váhy ± 50 g (vždy byla zvětšena pouze jedna hodnota hrubé nebo jemné frakce), tj. hodnota $F_{j,celk(vzorek)}$ byla nově vypočítána pro každý pokus čtyřikrát. Stejná hodnota „umělé“ chyby ± 50 g byla používána při analýze chyb v Hlom (2016)^[1]. Z nově vypočítané hodnoty $F_{j,celk(vzorek,chyby)}$ byla určena absolutní a relativní chyba:

$$r_{abs,chyby} = F_{j,celk(vzorek,chyby)} - F_{j,celk(vzorek)} \quad [\%] \quad (6-9)$$

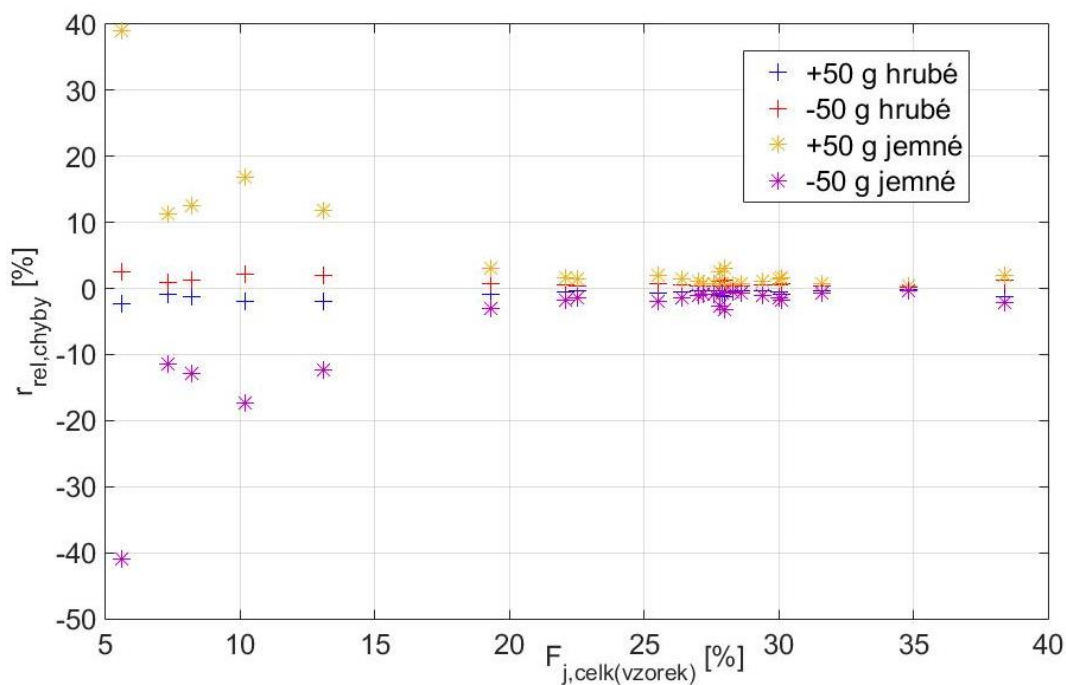
$$r_{rel,chyby} = \left(\frac{F_{j,celk(vzorek,chyby)}}{F_{j,celk(vzorek)}} - 1 \right) \cdot 100\% \quad [\%] \quad (6-10)$$

Výsledné hodnoty analýzy jsou zobrazeny na obrázcích 34, 35 a 36. Na obrázku 34 je zobrazena závislost relativní chyby na střední dopravní koncentraci. Velké relativní chyby jsou pouze při minimálních koncentracích menších než cca 3% a zároveň při chybě vážení jemných částic. Ostatní relativní chyby jsou menší než 4%, pokud uvážíme hodnoty C_{vd} větší než 5%, relativní chyby jsou zanedbatelné (menší než 2%). Na obrázku 35 je zobrazena závislost relativní chyby na celkovém poměru jemné frakce v transportované dvousložkové směsi. Pokud zanedbáme hodnoty $F_{j,celk(vzorek)}$ menší než cca 20%, relativní chyby jsou zanedbatelné (menší než 4%). Na obrázku 36 jsou pro ilustraci zobrazeny veškeré absolutní a relativní chyby, pokud zanedbáme chyby při minimálních dopravních koncentracích (tj. pokusy 6, 9, 15, 16 a 17), průměrná absolutní chyba je minimální - cca $\pm 0.4\%$ $F_{j,celk}$ (pro umělou chybu vážení jemné frakce).

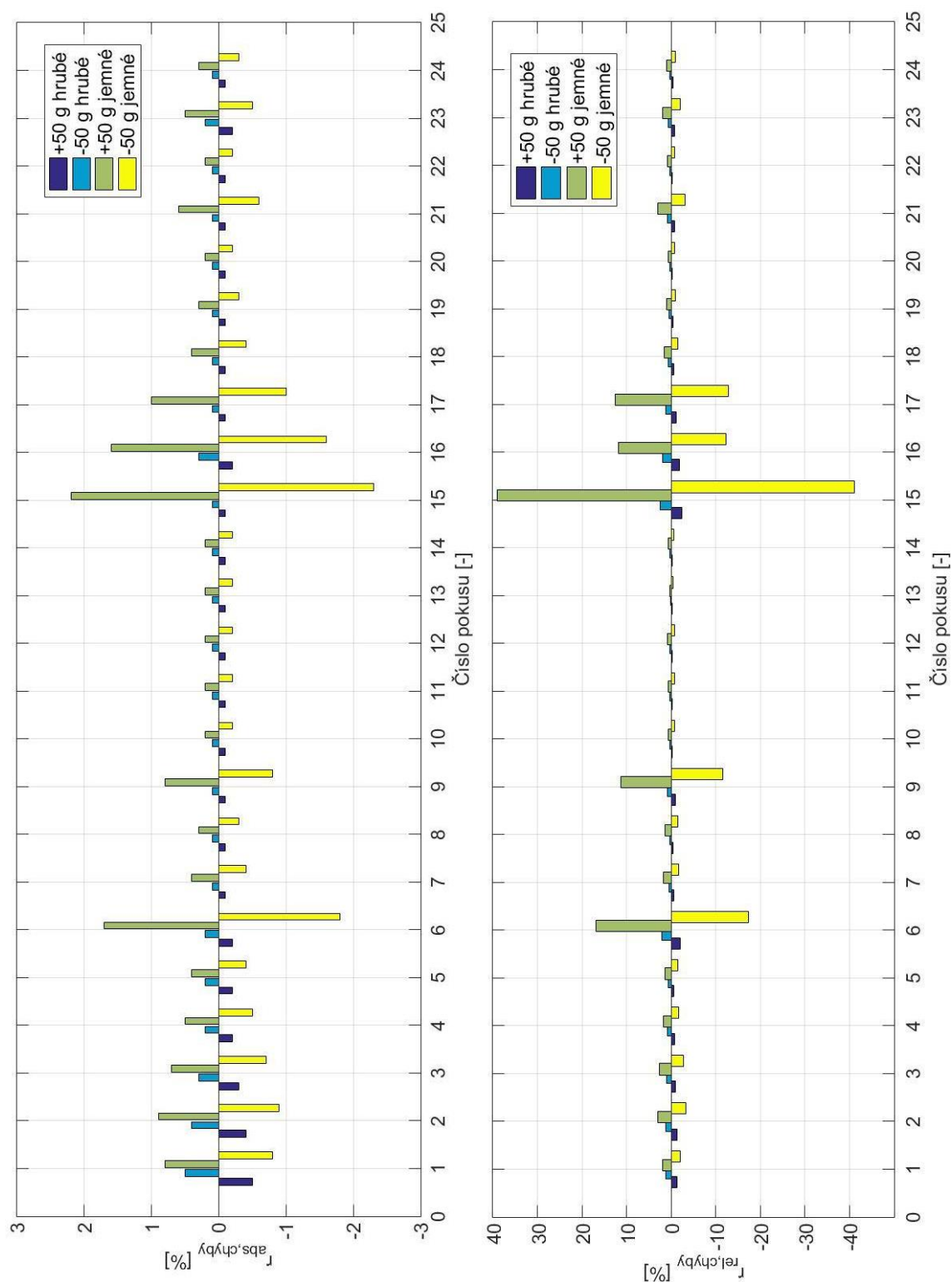
Z dosažených výsledků lze konstatovat, že metoda určování $F_{j,celk}$ odebráním vzorku při pokusu je pro stavy s intenzivním chodem sedimentu přesná a vhodná pro validaci výsledků metody analýzy videozáznamu.



Obr. 34 – Závislost relativní chyby na střední dopravní koncentraci



Obr. 35 – Závislost relativní chyby na celkovém poměru jemné frakce v transportované směsi



Obr. 36 – Porovnání absolutních a relativních chyb pro uměle zavedenou chybu vážení vzorku

6.5.2 Analýza videozáznamu

Pro odhad možné chyby této metody byly použity výsledky citlivostní analýzy. Z výsledků byly vybrány dva parametry, u kterých se vyskytovaly největší absolutní a relativní rozdíly – odečet výšky transportní vrstvy a mezní hodnoty světlosti. U dvou dalších parametrů (poloha a šířka analyzovaného okna) byly absolutní i relativní rozdíly citlivostní analýzy zanedbatelné. Pro vlastní odhad možné chyby, byly vybrány pouze pokusy, které nebyly vyloučeny v kapitole 6.4.. Relativní a absolutní rozdíly byly vypočítány dle vzorců 6-4 a 6-5.

Porovnání relativních a absolutních rozdílů je zobrazeno na obrázcích 37 a 38. Z hodnot absolutních rozdílů byla spočítána jejich průměrná hodnota $r_{abs,citlivost(průměr)}$ (zobrazená v tabulce 4). Z hodnot $r_{abs,citlivost(průměr)}$ je patrné, že jejich průměrné hodnoty, odpovídající vždy změně parametru na opačné strany, jsou v absolutní hodnotě relativně podobné. Proto je možné spočítat průměrný absolutní rozdíl pro každý měřený parametr $\pm r_{abs,průměr}$ jako průměr z dvou odpovídajících si hodnot $r_{abs,citlivost(průměr)}$ v absolutní hodnotě.

Tabulka 4 – Hodnoty průměrných absolutních rozdílů

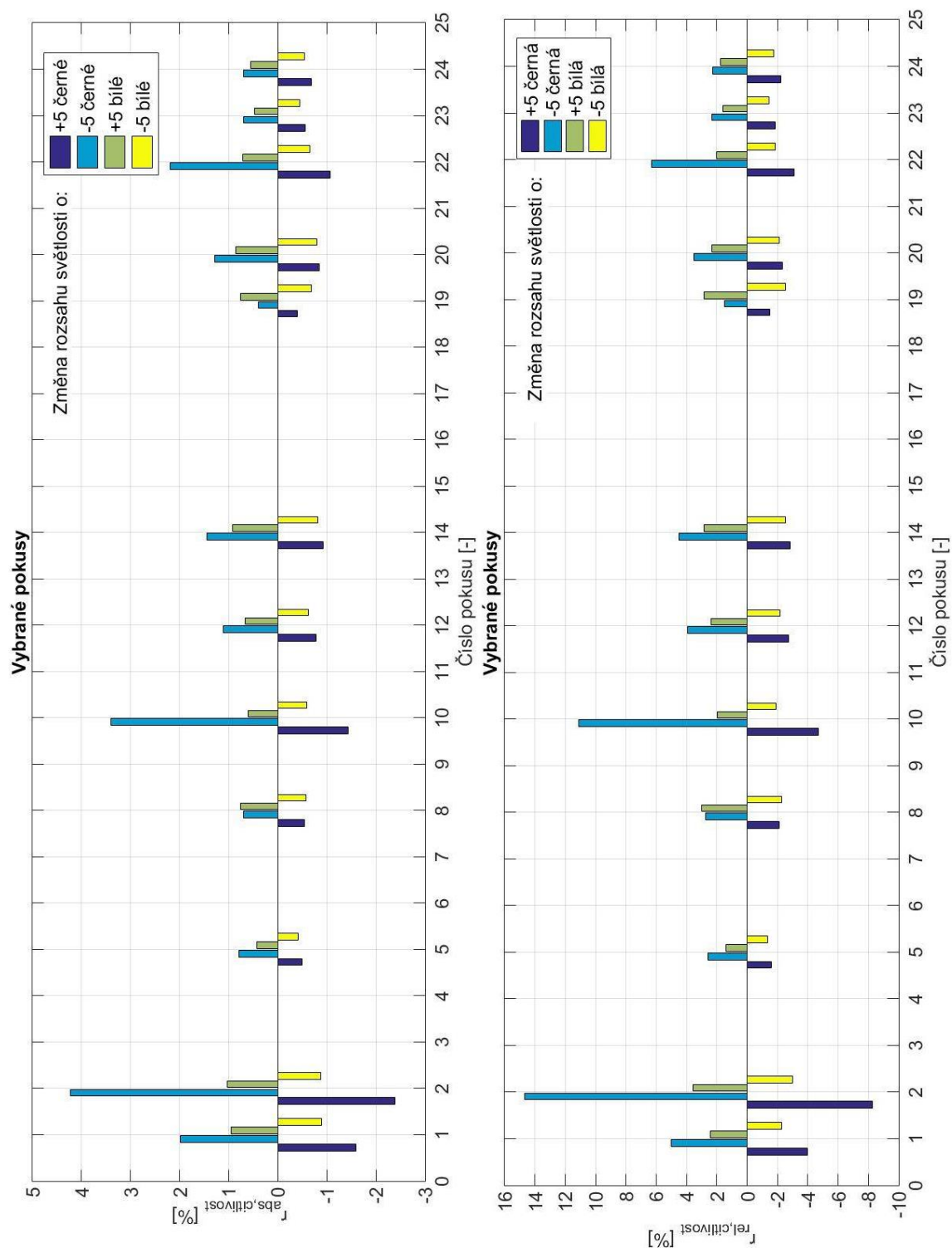
	Mezní hodnoty světlosti				Výška transportní vrstvy			
	+5 černá	-5 černá	+5 bílá	-5 bílá	dole +1.5 mm	dole -1.5 mm	nahore +2.5 mm	nahore -2.5 mm
$r_{abs,citlivost(průměr)}$ [%]	-1.0	1.6	0.7	-0.7	3.8	-3.1	-0.1	0.4
$\pm r_{abs,průměr}$ [%]	1.3		0.7		3.4		0.2	

Následně je možné pro velmi hrubý odhad možné chyby uvažovat $\pm r_{abs,průměr}$ jako standardní odchylku σ charakterizující variabilitu vypočtených hodnot. Více o teorii chyb lze nalézt například v Hlom (2016)^[1]. Dále je nutné složit tyto nezávislé odchylky dohromady. Pro celkovou standardní odchylku σ , složenou z nezávislých standardních odchylek σ_1 a σ_2 , platí: [1]

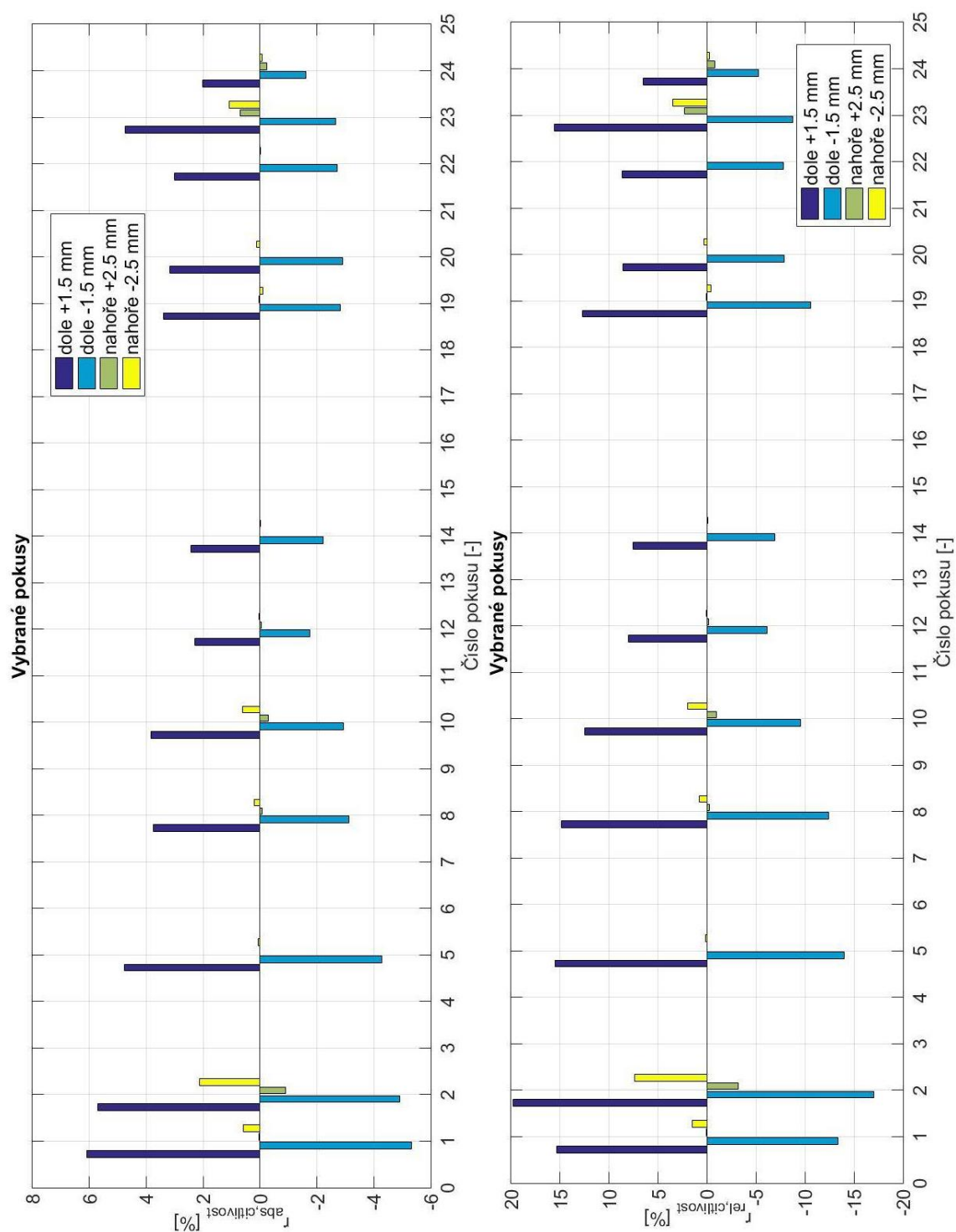
$$\sigma = \sqrt{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} \quad (6-11)$$

Pokud je jedna z odchylek třikrát větší než druhá, celková složená odchylka se zvětší pouze o cca 5%. Tudíž je možné tyto odchylky zanedbat, neb nejistota v určení odchylek je mnohem větší. Dle vztahu 6-11 je možné získat odhad celkové složené standardní odchylky výpočtu $F_{j,celk(skript)}$ pro stavy s intenzivním chodem sedimentu $\sigma_{analýza}$, složením odchylek výšky transportní vrstvy (dole ± 1.5 mm) a mezní hodnoty světlosti (± 5 bodů světlosti černé): $\sigma_{analýza} = 3.7\%$ $F_{j,celk}$. Odhadnutá možná chyba metody analýzy videozáznamu je mnohem větší než průměrná absolutní chyba metody odběru vzorku.

Možná chyba metody analýzy videozáznamu je způsobena chybou odečtu polohy sedliny, ostatní dílčí chyby této metody jsou víceméně zanedbatelné oproti této chybě. Průměrná relativní chyba způsobená odečtem polohy sedliny $r_{rel, citlivost}$ je 11%. V práci Hlom (2016)^[1] byla poloha sedliny určena jako vstupní veličina nejvíce zatížená chybou a nejvíce ovlivňující výsledky. Vzhledem k tomu, že téměř veškeré výsledky měření na sklopném žlabu jsou zatíženy relativně velkou chybou způsobenou odečtem polohy sedliny lze doporučit metodu analýzy videozáznamu pro určení celkového poměru hrubé a jemné frakce jako vyhovující a relativně přesnou.



Obr. 37 – Porovnání absolutních a relativních chyb vzniklých změnou mezních hodnot světlosti pro vybrané pokusy



Obr. 38 – Porovnání absolutních a relativních chyb vzniklých změnou výšky transportní vrstvy pro vybrané pokusy

7. Pórovitost dvousložkové směsi v sedlině v závislosti na poměru frakcí

Pórovitost sedliny, respektive její objemová koncentrace, je důležitý parametr charakterizující dnový materiál. Hodnota pórovitosti je například nutná pro odvození koncentračního profilu. Pórovitost p lze vyjádřit jako:

$$p = \frac{V_p}{V} [-] \quad (7-1)$$

Kde V_p je objem pórů a V je celkový objem vzorku. Vztah mezi pórovitostí a objemovou koncentrací C_{obj} , lze vyjádřit následovně:

$$C_{obj} = \frac{V - V_p}{V} = \frac{V_{pf}}{V} = 1 - p [-] \quad (7-2)$$

Kde V_{pf} je objem pevné fáze. Pórovitost lze dále charakterizovat specifickým objemem částic V_{spec} :

$$V_{spec} = \frac{1}{1 - p} [-] \quad (7-3)$$

Specifický objem charakterizuje, kolik jednotek prostoru zaujme vzorek obsahující jednu jednotku pevného objemu, tj. pokud vzorek o objemu pevné fáze 1 m^3 zaujme celkový objem $1,5 \text{ m}^3$, hodnota specifického objemu je 1,5.

7.1 Pórovitost dvousložkové směsi v sedlině

Pórovitost dvousložkové směsi v sedlině závisí na poměrném zastoupení hrubé a jemné frakce $F_{h,celk}$ a $F_{j,celk}$ (poměry objemů pevné fáze určené dle vzorce 4-3), velikosti zrn hrubé a jemné frakce d_h a d_j , specifickém objemu hrubé a jemné frakce $V_{h,spec}$ a $V_{j,spec}$ a na dokonalosti promíchání směsi. [14]

Hodnota pórovitosti dokonale promíchané dvousložkové směsi se nachází mezi dvěma mezními hodnotami pórovitosti – horní a dolní. Horní hranice popisuje stav, kdy jsou obě frakce od sebe odděleny (viz obrázek 39a), případně mají shodné nebo velmi podobné velikosti zrn. V tomto případě lze celkovou pórovitost $p_{horní\ hranice}$ vypočítat dle následujícího

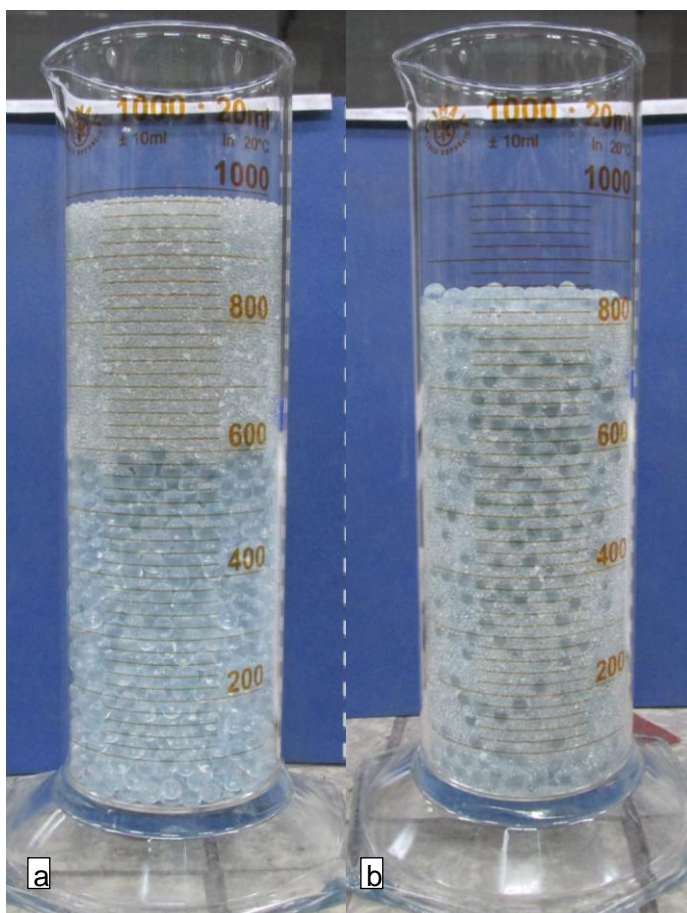
vztahu, kde p_{hf} je hodnota pórovitosti hrubé frakce a p_{jf} je hodnota pórovitosti jemné frakce: [15]

$$p_{horní\ hranice} = p_{hf} \cdot F_{h,celk} + p_{jf} \cdot F_{j,celk} [-] \quad (7-4)$$

Dolní hranice pórovitosti představuje nejmenší možnou teoretickou pórovitost dané směsi. Pokud je celkový poměr jemné frakce menší než pórovitost hrubé frakce, všechny zrna jemné frakce dokonale vyplní mezery mezi zrny hrubé frakce. Pokud je celkový poměr jemné frakce větší než pórovitost hrubé frakce, všechny mezery mezi zrny hrubé frakce jsou vyplněny zrny jemné frakce a celková pórovitost je závislá pouze na celkovém poměru jemné frakce a pórovitosti jemné frakce: [15]

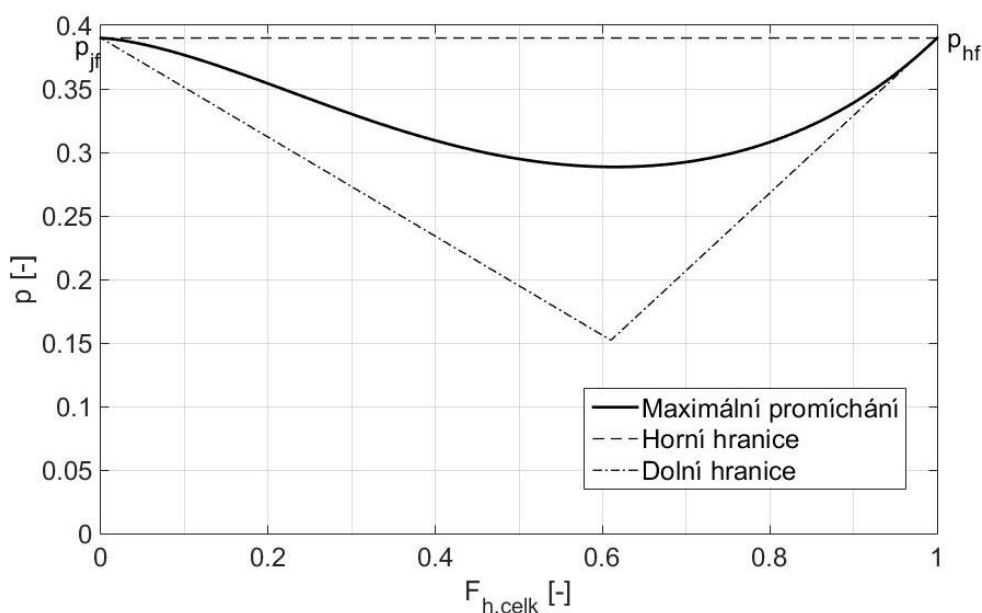
$$\begin{aligned} p_{dolní\ hranice} &= p_{hf} - F_{j,celk} \cdot (1 - p_{jf}) \quad \text{když} \quad F_{j,celk} < p_{hf} \\ p_{dolní\ hranice} &= F_{j,celk} \cdot p_{jf} \quad \text{když} \quad F_{j,celk} > p_{hf} \end{aligned} \quad (7-5)$$

Na obrázku 39 je zobrazeno porovnání nepromíchané směsi (a) a následně promíchané směsi (b). Z obrázků je patrné poměrně značné zmenšení celkového objemu směsi, tj. snížení celkové pórovitosti.

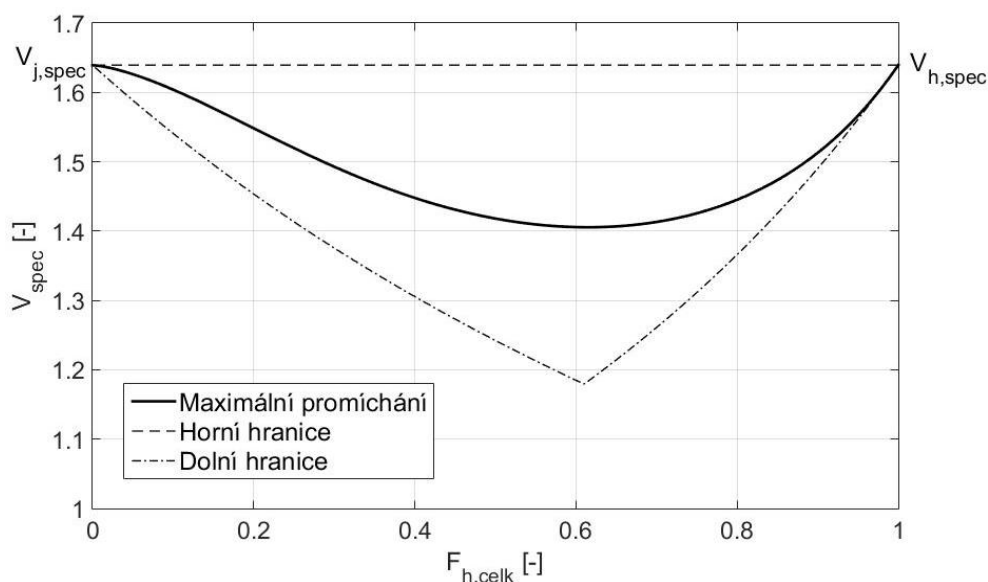


Obr. 39 – Porovnání celkových objemů nepromíchané a promíchané směsi sTK1270

Typický průběh pórovitosti a specifického objemu dvousložkové směsi kulových částic v závislosti na poměru hrubé a jemné frakce je zobrazen na obrázcích 40 a 41. Přerušovanou čarou je zobrazen průběh pórovitosti a specifického objemu nepromíchané směsi (tj. horní hranice – směsi jsou odděleny). Čerchovanou čarou je zobrazen teoretický průběh minimální hodnoty pórovitosti a specifického objemu směsi (tj. dolní hranice – minimální hodnota neuvažující velikost zrn jednotlivých frakcí). Mezi hranicemi se nachází průběh pórovitosti a specifického objemu pro ideálně promíchanou dvousložkovou směs – minimální hodnota s ohledem na velikost zrn jednotlivých frakcí (nižší hodnota pórovitosti nejde při daném poměru frakcí dosáhnout).



Obr. 40 – Typický průběh pórovitosti dvousložkové směsi v závislosti na poměru hrubé frakce



Obr. 41 – Typický průběh specifického objemu dvousložkové směsi v závislosti na poměru hrubé frakce

7.1.1 Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Westmanova modelu a modelu Yu a kol.

Určováním pórovitosti dvousložkové směsi se již zabývala řada autorů. Jedním z prvních byl A. E. R. Westman (1936)^[16]. Westmanův vztah určuje specifický objem dvousložkové směsi kulových částic V_{spec} v závislosti na objemovém poměru frakcí, specifických objemech hrubé a jemné frakce a na parametru G . Parametr G je závislý na poměru průměrů částic jednotlivých frakcí a charakterizuje, jak jsou částice jemné frakce schopné vyplňovat mezery mezi částicemi hrubé frakce. Westman odvodil vztah v následující podobě: [16]

$$\left(\frac{V_{spec} - V_{h,spec} \cdot F_{h,celk}}{V_{j,spec}} \right)^2 + 2 \cdot G \cdot \left(\frac{V_{spec} - V_{h,spec} \cdot F_{h,celk}}{V_{j,spec}} \right) \cdot \left(\frac{V_{spec} - F_{h,celk} - V_{j,spec} \cdot F_{j,celk}}{V_{h,spec} - 1} \right) + \left(\frac{V_{spec} - F_{h,celk} - V_{j,spec} \cdot F_{j,celk}}{V_{h,spec} - 1} \right)^2 = 1 \quad (7-6)$$

Westman svůj vztah ověřil pro směsi písku a štěrku. Westmanovým vztahem se dále zabýval Yu a kol.(1993)^[14]. Tito autoři odvodili na základě vyhodnocení vlastních pokusů vztah pro určení parametru G na základě poměru průměrů částic hrubé a jemné frakce r . [14]

$$r = \frac{d_j}{d_h} [-] \quad (7-7)$$

$$\frac{1}{G} = 1,355 \cdot r^{1,566} \quad \text{když } r \leq 0,824$$

$$\frac{1}{G} = 1 \quad \text{když } r > 0,824 \quad (7-8)$$

Hodnota parametru G je závislá na poměru r . Pokud je hodnota větší než hodnota kritické poměru $r=0,824$, parametr G je roven jedné. Pokud je parametr G roven jedné, zna jemné frakce nejsou schopna vyplnit mezery mezi zrna hrubé frakce (mezery jsou pro zrna jemné frakce příliš malé). Pokud je do Westmanova vztahu 7-6 dosazena hodnota parametru G rovna jedné, vychází specifický objem směsi, respektive celková pórovitost, jako horní hranice pórovitosti směsi (vztah se redukuje a hodnoty specifického objemu směsi, respektive pórovitosti, vycházejí stejně jako dle vztahu 7-4). [14]

Yu a kol.(1993)^[14] se dále zabývali určením pórovitosti dvousložkové směsi nekulových částic. Pro tyto účely použili takzvaný ekvivalentní mísící průměr nekulové částice d_p definovaný vztahem: [14]

$$d_p = \left(3,1781 - 3,6821 \cdot \frac{1}{\psi} + 1,5040 \cdot \frac{1}{\psi^2} \right) \cdot d_v \quad [-] \quad (7-9)$$

Kde ψ je kulovitost a d_v je ekvivalentní průměr částice. Kulovitost ψ je definována jako poměr plochy koule o stejném objemu jako zaujímá nekulová částice vůči ploše nekulové částice. Ekvivalentní průměr částice d_v je definován jako průměr kulové částice o stejném objemu jako zaujímá nekulové částice. [14]

Takto získaný ekvivalentní mísicí průměr nekulové částice d_p lze následně dosadit do vztahu 7-7 a pomocí vztahu 7-6 získat celkovou pórovitost dvousložkové směsi nekulových částic. Yu a kol. ověřili vztahy pro výpočet pórovitosti dvousložkové směsi nekulových částic na mnoha tvarech částic – koule, válce, krychle, disky a další nepravidelné tvary. [14]

7.1.2 Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Mota a kol.

Autoři Mota a kol. (2001)^[17] odvodili pro svůj výzkum pórovitosti a nasycené hydraulické vodivosti dvousložkových směsí model predikující pórovitost dvousložkové směsi pro kulové částice. Ověření modelu pórovitosti bylo provedeno pro skleněné kuličky obdobných průměrů jako směs sTK1230. Vztah pro výpočet pórovitosti směsi dle Mota a kol. má následující tvar: [17]

$$p = \left(1 - (1 - p_{hf}) \cdot F_{h,celk}^{(1,35 - F_{h,celk} \cdot F(r))} \right) \cdot \left(p_{jf} + (1 - p_{jf}) \cdot F_{h,celk}^{f(r)} \right) \quad [-] \quad (7-10)$$

Kde $F(r)$ a $f(r)$ jsou funkce závislé na poměru částic hrubé a jemné frakce r a lze je vyjádřit následovně: [17]

$$F(r) = \left(0,27 - \frac{1,55}{1 + \frac{1}{\exp\left(\frac{r+0,06}{0,27}\right)}} \right)^{-1} \quad (7-11)$$

$$f(r) = 5 - 4 \cdot \sqrt{r} \quad [-] \quad (7-12)$$

7.1.3 Určení pórovitosti dvousložkové směsi dle Zhanga a kol.

Autoři Zhang a kol. (2009)^[15] se také zabývali výzkumem pórovitosti a nasycené hydraulické vodivosti dvousložkových směsí kulových částic. Ověření vztahů pro výpočet pórovitosti bylo provedeno pro směsi skleněných kuliček ($d = 2 - 10$ mm), písku ($d = 0,5$ mm) a

jílu ($d=0,015$ mm). Vlastní vztahy pro určení pórovitosti jsou založené na mísicím koeficientu λ , který charakterizuje míru promísení směsi. Koeficient λ může dosahovat hodnot od 0 do 1, hodnota nula znamená nulové promísení směsí ($p_{horní\ hranice}$), hodnota 1 teoretické maximální promíchání směsi ($p_{dolní\ hranice}$). Na základě provedených pokusů tito autoři odvodili vztah pro průměrnou hodnotu mísicího koeficientu λ pro ideálně promíchané dvousložkové směsi kulových částic, jejichž hodnota poměru r je větší než 0,048: [15]

$$\lambda = 0,0363 \cdot \left(\frac{d_h}{d_j} \right) + 0,2326 [-] \quad \text{když } r > 0,048 \quad (7-13)$$

Následně je možné vypočítat pórovitost dvousložkové směsi kulových částic dle Zhanga a kol. pomocí následujícího vztahu: [15]

$$\begin{aligned} \rho &= (F_{h,celk} - \lambda \cdot F_{h,celk} + \lambda) \cdot p_{hf} + F_{j,celk} \cdot p_{jf} + \lambda \cdot F_{h,celk} [-] & \text{když } F_{j,celk} < p_{hf} \\ \rho &= (1 - \lambda) \cdot F_{h,celk} \cdot p_{hf} + F_{j,celk} \cdot p_{jf} [-] & \text{když } F_{j,celk} \geq p_{hf} \end{aligned} \quad (7-14)$$

7.2 Laboratorní stanovení pórovitosti dvousložkových směsí

V rámci diplomové práce byl určen průběh pórovitosti dvousložkové směsi v závislosti na poměru hrubé a jemné frakce pro 2 směsi (sTK1230 a HT), které byly použity při pokusech na sklopném žlabu, a pro 2 směsi (sTK1270 a HT25), které byly vytvořeny pouze pro účely ověření vztahů pro výpočet pórovitosti dvousložkové směsi dle výše zmíněných autorů. Pro každou směs bylo měřeno celkem 11 různých poměrů hrubé a jemné frakce odstupňovaných po 10%.

7.2.1 Průběh měření pórovitosti dvousložkové směsi

Prvním krokem byla příprava směsi s požadovaným poměrem hrubé frakce $F_{h,celk}$. Tato směs byla vytvořena dle vztahu 4-3, objemy hrubé a jemné frakce byly určeny na základě znalosti hustoty částic vážením. Následně byly částice co nejlépe promíchány a pomalu a rovnoměrně sypány do odměrného válce (viz obrázek 39b). Poté byl odečten celkový objem směsi V a pomocí známého objemu částic V_{pf} byla zjištěna pórovitost směsi:

$$\rho = \frac{V - V_{pf}}{V} [-] \quad (7-15)$$

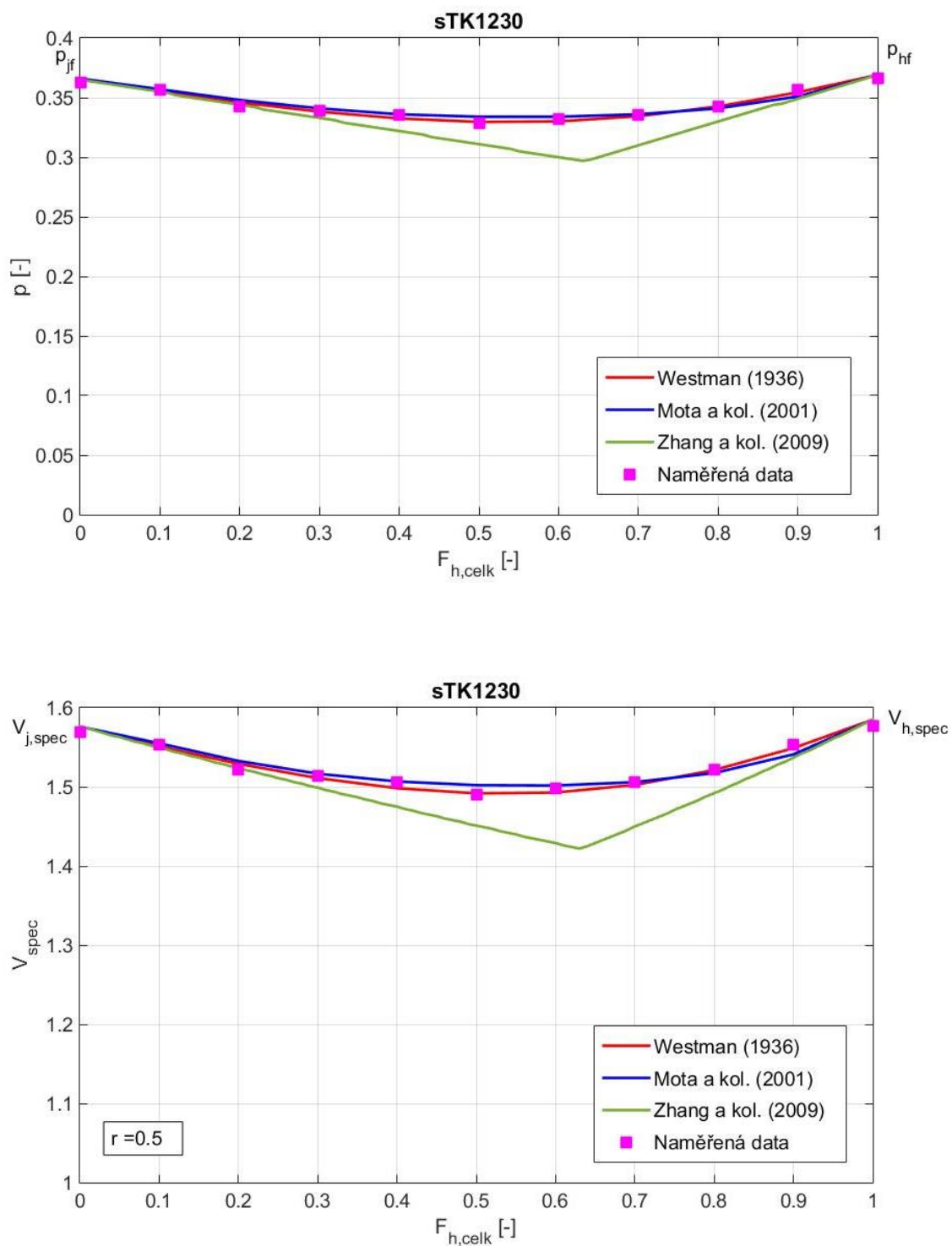
Každý měřený stav byl vícekrát opakován, jako výsledná hodnota daného poměru frakcí bylo bráno měření s nejnižší naměřenou pórovitostí směsi – tj. nejideálněji promíchaná směs.

7.2.2 Naměřené průběhy pórovitostí a specifických objemů dvousložkových směsí

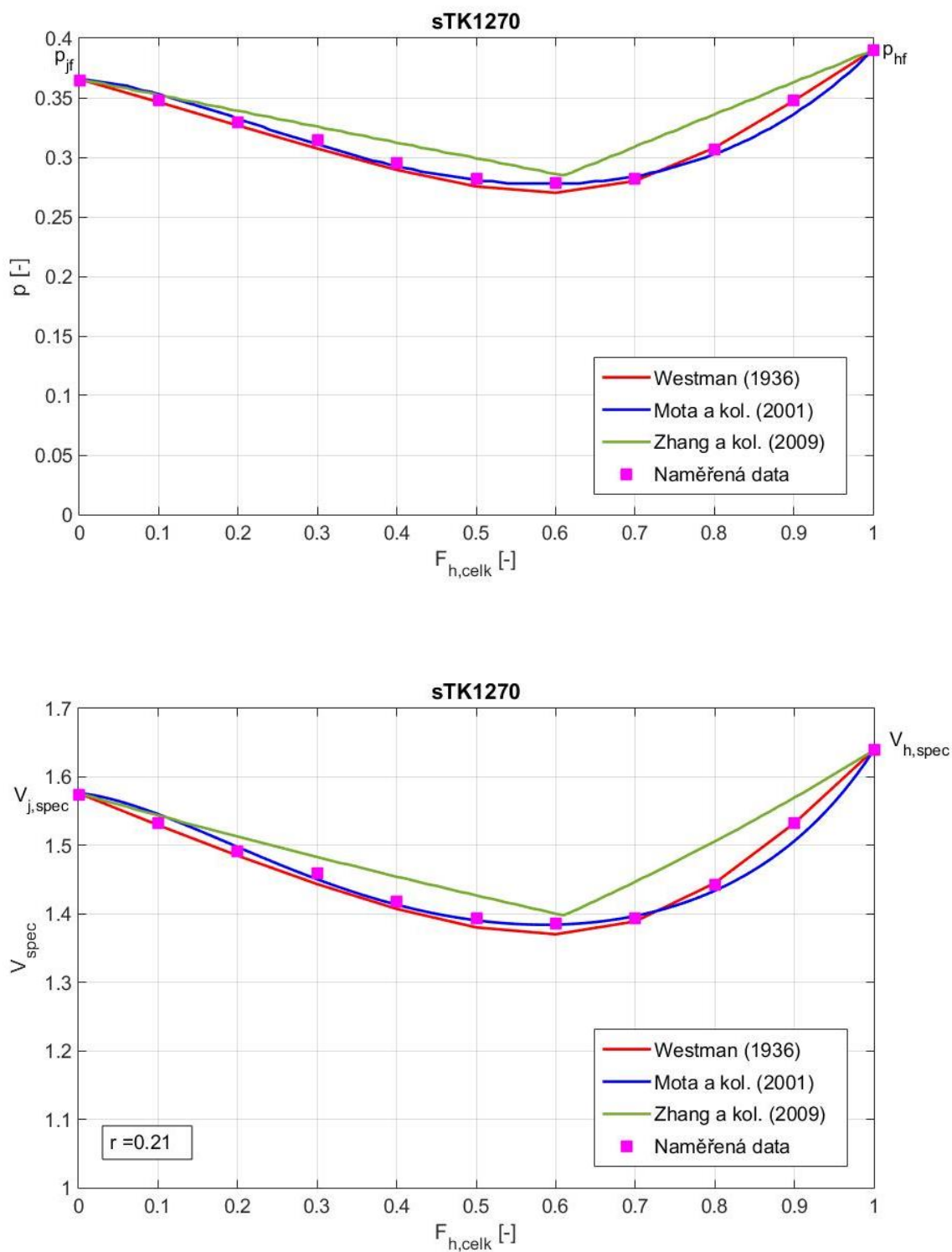
Výsledky provedených měření pórovitosti dvousložkové směsi a jejich porovnání s hodnotami predikovanými výše zmíněnými modely je zobrazeno na obrázcích 42, 43, 44 a 45. Pro každou směs jsou zobrazeny průběhy pórovitosti a specifického objemu směsi v závislosti na poměru hrubé frakce.

Pro směsi kulových částic je velmi dobrá shoda naměřených dat se vztahy dle Westmana + Yu a kol. a dle Mota a kol., maximální absolutní rozdíl mezi naměřenou a predikovanou hodnotou pórovitosti je 0,005. Vztah dle Zhanga a kol. byl odvozen na základě pokusů se směsmi jejichž průměry zrn se velmi lišili – z grafů je patrné, že pro směs sTK1230 ($r=0,5$), není průběh pórovitosti dle Zhanga a kol. optimální. Pro směs sTK1270 ($r=0,21$), s nižším poměrem r není průběh dokonalý, ale více se blíží naměřeným hodnotám než v případě směsi sTK1230.

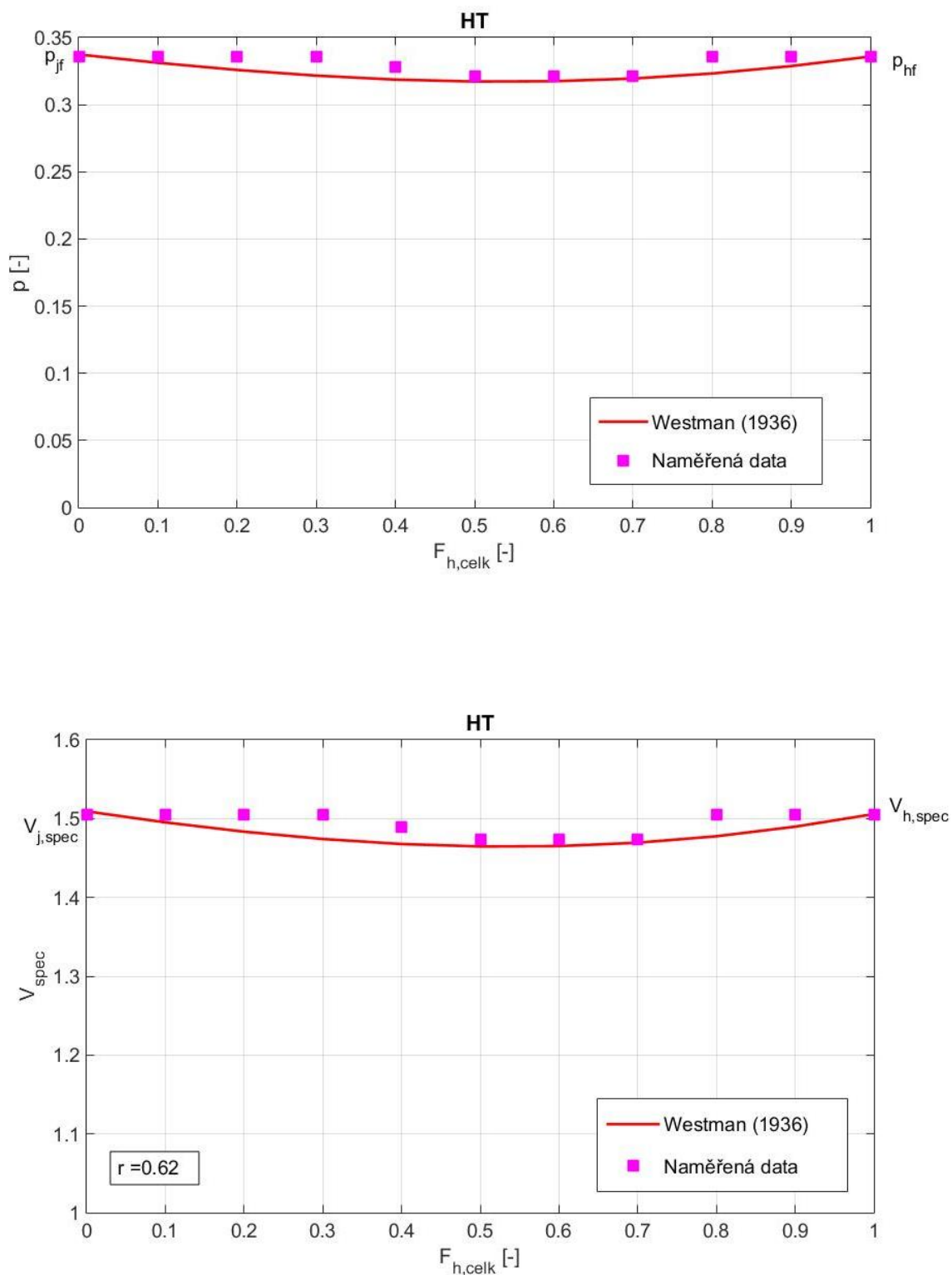
V případě směsí nekulových částic lze spatřit také relativně dobrou shodu měřených dat s predikovanou hodnotou. Maximální absolutní rozdíl mezi naměřenou a predikovanou hodnotou pórovitosti je cca 0,014. V případě směsi HT odpovídají naměřené hodnoty predikovaným, pokud je poměr hrubé a jemné frakce podobný. Naopak pokud jedna frakce převládá, hodnoty se liší. V případě směsi HT25 je výše popsáný trend opačný, největší rozdíly se vyskytují v případě, že je poměr hrubé a jemné frakce podobný. Za kladný výsledek lze považovat relativně dobrou shodu dat pro směs HT25 tvořenou částicemi tvaru čoček, které jsou svým tvarem velmi odlišné od koule. Pro ověření vztahů dle Westmana + Yu a kol. by bylo vhodné provést ověření na směsi, jejichž průměry zrn by se více lišily.



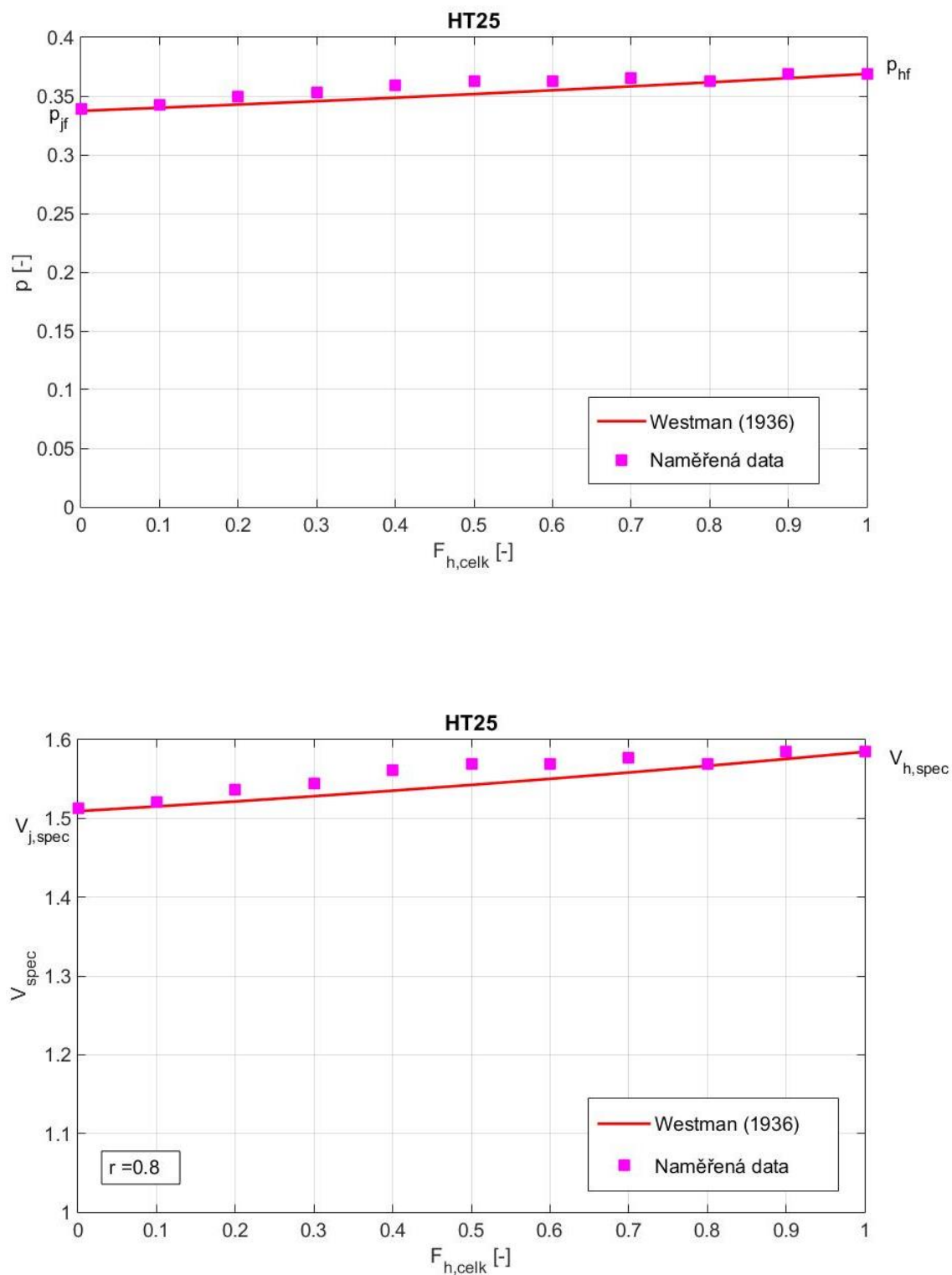
Obr. 42 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs sTK1230



Obr. 43 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs sTK1270



Obr. 44 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs HT



Obr. 45 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs HT25

8. Závěr

Všechny cíle stanovené v zadání diplomové práce byly dosaženy. Pro vyhodnocení poměru frakcí v transportované dvousložkové směsi bylo k dispozici celkem 49 videozáznamů. Z těchto záznamů bylo vybráno celkem 24 videozáznamů, které se dle vizuální kontroly zdály vhodné k následující analýze, zbylé záznamy byly vyřazeny.

Pro každý experiment bylo nutné určit hranice analyzované oblasti (tj. šířku a výšku výřezu z videozáznamu) a mezní hodnoty světlosti částic hrubé a jemné frakce. Pro určení neoptimálnějších hodnot byla provedena citlivostní analýza hranic analyzované oblasti a mezních hodnot světlosti. Z této analýzy vyplynuly následující závěry:

Vodorovná poloha analyzovaného výřezu zásadně neovlivňuje výsledky výpočtu poměru hrubé a jemné frakce za předpokladu rovnoměrně nasvícené analyzované oblasti.

Šířka analyzovaného okna zásadně neovlivňuje výsledky výpočtu, ovšem pro krátké záznamy proudění s malou šířkou analyzovaného okna není průběh poměru hrubé frakce po výšce spojitý jako pro široká okna. Dle dosažených výsledků pro okno o šířce jednoho pixelu lze očekávat, že pro dostatečně dlouhý záznam o dostatečně velké frekvenci snímání, je možné získat spojitý průběh poměru hrubé frakce po výšce stejný jako pro široká analyzovaná okna.

Pro každý záznam bylo nutné odečíst výšku transportní vrstvy, výšky byly porovnány s výškami odečtenými v místě měření rychlostních profilů při pokusech. Většina výšek se lišila maximálně o cca polovinu průměru částice hrubé frakce. Na základě těchto výsledků byla uvažována chyba v odečtu polohy transportní vrstvy jako polovina výšky částice. Z citlivostní analýzy vyplynulo, že nejdůležitější je správné odečtení polohy sedliny na videozáznamu.

Vzhledem k rozdílným světelným podmínkám videozáznamů bylo třeba určit pro každý záznam vlastní mezní hodnoty světlosti bílých a černých částic. Citlivostní analýza odhalila poměrně velkou citlivost výsledků především na mezní hodnotu světlosti černých částic.

Pro porovnání celkového poměru hrubé a jemné frakce získaného analýzou videozáznamu s výsledky získanými odběrem a rozbořem vzorku bylo na základě výsledků

citlivostní analýzy určeno analyzované okno o maximální možné šířce (tj. 3 cm). Pokud byly vyřazeny pokusy obsahující typické problémy, byla mezi oběma metodami poměrně dobrá shoda. Možná absolutní chyba metody rozboru odebraného vzorku byla určena jako 0.4% $F_{j,celk}$, tuto metodu lze považovat za přesnou a vhodnou pro kalibraci metody analýzy videozáznamu. Možná absolutní chyba metody analýzy videozáznamu byla určena jako 3.7% $F_{j,celk}$, tato chyba je způsobena především chybou v odečtu polohy sedliny. Odečet polohy sedliny ovšem ovlivňuje veškeré výsledky měření transportu sedimentu ve sklopném žlabu.

Dle výsledků provedených analýz lze považovat metodu určování poměru hrubé a jemné frakce analýzou videozáznamu za poměrně přesnou a vhodnou metodu. Z výsledků citlivostní analýzy vyplynuly následující doporučující závěry pro zlepšení přesnosti metody: rovnoměrně nasvícené proudění (po výšce i šířce), správně zvolené barva pozadí protilehlé stěny, dostatečně dlouhý záznam s vysokou frekvencí záznamu. Dále je třeba klást důraz na správné určení polohy vrcholu sedliny a správné určení mezních hodnot světlosti částic jemné a hrubé frakce.

Dalším cílem práce bylo posouzení vlivu vyřídění směsi na maximální koncentraci v sedlině, respektive na minimální pórovitost v sedlině. Naměřené hodnoty pórovitostí dvou směsí kulových částic s různými poměry hrubé a jemné frakce byly porovnány s celkem třemi vztahy pro určení pórovitosti dvousložkové směsi. Velmi dobrá shoda naměřených dat s daty dle modelů byla pro vztahy dle Westmana + Yu a kol. a dle Mota a kol.. Maximální absolutní rozdíl byl cca 0,5% pórovitosti. Naopak výsledky dle vztahu Zhanga a kol. neodpovídaly naměřeným hodnotám pórovitosti. Pórovitost dvousložkových směsí kulových částic používaných při měření na sklopném žlabu je možné vypočítat s dostatečnou přesností dle vztahu Westmana + Yu a kol. a případně dle vztahu Mota a kol. Naměřené hodnoty pórovitosti dvou směsí nekulových částic s různými poměry hrubé a jemné frakce byly porovnány se vztahem Westmana + Yu a kol.. V případě směsí nekulových částic si naměřený a predikovaný průběh pórovitosti neodpovídá tak přesně jako v případě směsí kulových částic (dále bylo by vhodné ověřit tento vztah na směsi, jejichž průměry zrn by byly více odlišné). Vztah dle Westmana + Yu a kol. lze použít pro odhad průběhu pórovitosti směsí nekulových částic. Přesný průběh pórovitosti dvousložkové směsí nekulových částic, používaných při měření na sklopném žlabu, by bylo ideální určit pro každou směs experimentálně.

9. Seznam zkratk a symbolů

B	konstanta třecí rovnice pro dno	[-]
b	šířka žlabu	[m]
c	hodnota střední dopravní koncentrace po výšce	[-]
C_{vd}	celková hodnota střední dopravní koncentrace	[-]
C_{obj}	objemová koncentrace	[-]
d	rozměr částice	[m]
d_h	průměr částic hrubé frakce	[m]
d_j	průměr částic jemné frakce	[m]
d_{50}	střední velikost zrna	[m]
d_p	ekvivalentní mísící průměr nekulové částice	[m]
d_v	ekvivalentní průměr částice	[m]
$f(r)$	funkce závislá na poměru průměrů částic hrubé a jemné frakce	[-]
f_0	frekvence vyslaného signálu	[Hz]
f_d	změněná frekvence přijatého signálu	[Hz]
$F(r)$	funkce závislá na poměru průměrů částic hrubé a jemné frakce	[-]
F_h	poměr hrubé frakce v dvousložkové směsi	[-]
$F_{h,celk}$	celkový poměr hrubé frakce v dvousložkové směsi	[-]
$F_{j,celk}$	celkový poměr jemné frakce v dvousložkové směsi	[-]
$F_{j,celk(skript)}$	celkový poměr jemné frakce v dvousložkové směsi získaný analýzou videozáznamu	[-]
$F_{j,celk(skript,citlivost)}$	celkový poměr jemné frakce v dvousložkové směsi získaný analýzou videozáznamu při citlivostní analýze	[-]
$F_{j,celk(vzorek)}$	celkový poměr jemné frakce v dvousložkové směsi získaný síťovým rozbořem odebraného vzorku	[-]
$F_{j,celk(vzorek,chyby)}$	celkový poměr jemné frakce v dvousložkové směsi získaný síťovým rozbořem se zavedenou chybou	[-]
g	gravitační zrychlení	[m/s ²]
G	parametr popisující míchání hrubé a jemné frakce	[-]

H	hloubka proudění	[m]
H _{sh}	výška transportní vrstvy	[m]
h _v	rychlostní výška	[m. v. s.]
h _t	výška transportní vrstvy	[m]
h _{t,video}	výška transportní vrstvy určená z videozáznamu	[m]
h _{t,vizuál}	výška transportní vrstvy určená vizuálně při pokusu	[m]
i	sklon dna/hydraulický gradient	[-]
l _e	sklon čáry energie	[-]
k _s	drsnostní výška	[m]
m	hmotnost	[kg]
O	omočený obvod	[m]
p	pórovitost	[-]
p _{dolní hranice}	minimální pórovitost dvousložkové směsi	[-]
p _{horní hranice}	maximální pórovitost dvousložkové směsi	[-]
p _{hf}	pórovitost hrubé frakce	[-]
p _{jf}	pórovitost jemné frakce	[-]
p _h	relativní procentuální rozdíl výšek transportních vrstev	[%]
Q	celkový průtok směsi	[m ³ /s]
Q _h	průtok hrubé frakce v dvousložkové směsi	[m ³ /s]
Q _j	průtok jemné frakce v dvousložkové směsi	[m ³ /s]
Q _s	průtok splavenin	[m ³ /s]
R	hydraulický poloměr	[m]
R _b	hydraulický poloměr příslušný dnu	[m]
r	poměr průměrů zrn	[-]
r _{rel}	relativní rozdíl hodnot poměru jemné frakce	[%]
r _{rel,chyby}	relativní rozdíl hodnot poměru jemné frakce při určování možné chyby	[%]
r _{rel,citlivost}	relativní rozdíl hodnot poměru jemné frakce při citlivostní analýze	[%]
r _{abs}	absolutní rozdíl hodnot poměru jemné frakce	[%]
r _{abs,chyby}	absolutní rozdíl hodnot poměru jemné frakce při určování možné chyby	[%]
r _{abs,citlivost}	absolutní rozdíl hodnot poměru jemné frakce při	

	citlivostní analýze	[%]
$r_{\text{abs,citlivost(průměr)}}$	průměrná hodnota absolutního rozdílu hodnot poměru jemné frakce při citlivostní analýze	[%]
$\pm r_{\text{abs,průměr}}$	zprůměrovaná hodnota dvou odpovídajících si hodnot $r_{\text{abs,citlivost(průměr)}}$	[%]
s	relativní hustota splaveninové částice	[-]
S	průtočná plocha	[m ²]
t	doba návratu ultrazvukového signálu	[s]
u	rychlost proudění	[m/s]
u*	třecí rychlost	[m/s]
u*b	třecí rychlost vztažená ke dnu	[m/s]
u _{ult}	rychlost šíření ultrazvukového signálu ve vodě	[m/s]
u _{tr}	rychlost proudění ve výšce y _{tr} nad sedlinou	[m/s]
u _{sh}	rychlost proudění v místě vrcholu transportní vrstvy	[m/s]
u _t	nerušená sedimentační rychlost částice	[m/s]
V	objem	[m ³]
V _p	objem pórů	[m ³]
V _{pf}	objem pevné fáze	[m ³]
V _{spec}	specifický objem částic	[-]
V _h	objem částic hrubé frakce bez pórů	[m ³]
V _{h,spec}	specifický objem částic hrubé frakce	[-]
V _j	objem částic jemné frakce bez pórů	[m ³]
V _{j,spec}	specifický objem částic jemné frakce	[-]
X	poloha měření rychlosti před sondou UVP	[m]
Δy	poloha nulové rychlosti nad sedlinou	[m]
y	poloha nad sedlinou	[m]
y _{ini}	teoretická poloha počátku logaritmického profilu nad sedlinou	[m]
y _{tr}	poloha nad sedlinou, v níž přechází logaritmický profil na lineární	[m]
y _{sh}	poloha vrcholu transportní vrstvy	[m]

λ	mísicí koeficient	[-]
ρ_s	objemová hustota splavenin	[kg/m ³]
ρ_w	objemová hustota vody	[kg/m ³]
τ_0	tečné napětí na dně	[Pa]
θ	Shieldsovo číslo	[-]
σ	standardní odchylka	
$\sigma_{\text{analýza}}$	standardní odchylka metody analýzy videozáznamu	[%]
ψ	kulovitost	[-]

10. Literatura

- [1] HLOM, Jan. Analýza nejistot při měření chodu splavenin ve sklopném žlabu. Praha, 2016, 56 s. Dostupné také z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/65854/F1-BP-2016-Hlom-Jan-Finalni_verze_bak_JH_bez_podpisu.pdf?sequence=-1. Bakalářská práce. České vysoké učení technické, Fakulta stavební. Vedoucí práce Prof. Dr. Ing. Václav Matoušek.
- [2] ZROSTLÍK, Štěpán, Vojtěch BAREŠ, Jan KRUPÍČKA, Tomáš PICEK a Václav MATOUŠEK (2014). Rozdělení rychlosti v otevřeném kanálu s intenzivním pohybem hrubozrnného sedimentu: srovnání experimentálních metod. *28th Symposium on anemometry*. 3. – 4. června 2014, Holany, Česká republika. Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, 2014. Str. 112 – 119. ISBN: 978-80-87117-11-8
- [3] ZROSTLÍK, Štěpán, Tomáš PICEK, Jan KRUPÍČKA a Václav MATOUŠEK. Vyhodnocení turbulentních charakteristik proudění s chodem sedimentu pomocí akustické anemometrie. In: CHÁRA, Zdeněk a Ladislav KLABOCH. *29th Symposium on anemometry*. 1. Holany - Lhotice: Institute of Hydrodynamics ASCR, v. v. i, 2015, 8 s. ISBN 978-80-87117-13-2. Dostupné také z: <http://docplayer.cz/2858535-Symposium-on-anemometry.html>
- [4] CAPART, Hervé a Luigi FRACCAROLLO. Transport layer structure in intense bed-load. *Geophysical research letters*. 2011, 38, 6. Dostupné také z: <http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1029/2011GL049408/epdf>
- [5] ZROSTLÍK, Štěpán, Vojtěch BAREŠ, Jan KRUPÍČKA, Tomáš PICEK a Václav MATOUŠEK. One-dimensional Velocity Profiles in Open-channel Flow with Intense Transport of Coarse Sediment. In: DANČOVÁ, Petra a Tomáš VÍT. *Proceedings of the International Conference Experimental Fluid Mechanics 2014*. Český Krumlov, 18. - 21. listopadu 2014, Str. 778-784.
- [6] MATOUŠEK, Václav, Vojtěch BAREŠ, Jan KRUPÍČKA, Tomáš PICEK a Štěpán ZROSTLÍK. Experimental investigation of internal structure of open-channel flow with

- intense transport of sediment. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*. 2015, 2015(4), 318-326. DOI: <https://doi.org/10.1515/johh-2015-0035>. ISSN 0042-790X.
- [7] BEL, Coraline, Kristina RORSMAN a Philippe FREY. Size-segregation in bedload transport: Experiments and binary continuous modelling. In: *Thesis: Symposium on Two-phase Modelling for Sediment dynamics in Geophysical Flows*. Chatou, France, 2013.
- [8] ZROSTLÍK, Štěpán a Václav MATOUŠEK. On the Effect of Segregation on Intense Bimodal Bed Load. In: *Experimental Fluid Mechanics 2016*. Mariánské lázně 15. - 18. listopadu 2016, 2016, Str. 976-982.
- [9] ZROSTLÍK, Štěpán a Václav MATOUŠEK. Kinetic Theory Based Approach to Modelling of Segregation in Intense Bimodal Bed Load Transport. In: *18th International Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*. Praha, Czech Republic, 2017, Str. 409-417. ISBN 978-83-7714-269-8. ISSN 0867-7964.
- [10] ZROSTLÍK, Štěpán, Vojtěch BAREŠ, Jan KRUPÍČKA, Tomáš PICEK a Václav MATOUŠEK. Comparison of Transport and Friction of Mono-sized and Two-species Sediment in Upper Plane Bed Regime. In: *17th Conference on Transport and Sedimentation of Solid Particles*. 22. - 25. September 2015, Delft, Netherlands, 8 s. ISBN 978-83-927084-8-3. ISSN 0867-7964.
- [11] HERGAULT, Virginie, Philippe FREY, Francois MÉTIVIER, Cécile BARAT, Christophe DUCOTTET, Tobias BOHM a Christophe ANCEY. Image processing for the study of bedload transport of two-size spherical particles in a supercritical flow. *Experiments in Fluids*. 2010, 49, Str. 1095-1107. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00348-010-0856-6>. ISSN 1432-1114.
- [12] SPINEWINE, Benoît, Hervé CAPART, Michele LARCHER a Yves ZECH. Three-dimensional Voronoï imaging methods for the measurement of near-wall particulate flows. *Experiments in Fluids*. 2003, 34, Str. 227-241. DOI: [10.1007/s00348-002-0550-4](https://doi.org/10.1007/s00348-002-0550-4). ISSN 0723-4864.

- [13] SPINEWINE, Benoit, Hervé CAPART a Michele LARCHER. Laser stripe measurements of near-wall solid fraction in channel flows of liquid-granular mixtures. *Experiments in Fluids*. 2011, 50(6), Str. 1507-1525. DOI: 10.1007/s00348-010-1009-7. ISSN 0723-4864.
- [14] YU, Ai-Bing, Nicholas STANDISH a Arnold MCLEAN. Porosity calculation of binary mixtures of nonspherical particles. *Journal of the American Ceramic Society*. 1993, 76(11), Str. 2813-2816.
- [15] ZHANG, Zhuanfang Fred, Andy WARD a Jason KELLER. Determining the porosity and saturated hydraulic conductivity of binary mixtures. *Vadose Zone Journal*. 2009, 10.
- [16] WESTMAN, A. E. R. The packing of particles: Empirical equations for intermediate diameter ratios. *Journal of the American Ceramic Society*. 1936, 19(1-12), Str. 127-129.
- [17] MOTA, Manuel, José A TEIXEIRA, William R. BOWEN a Alexander YELSHIN. Binary spherical particlemixed beds: porosity and permeability relationship measurement. *Transactions of the Filtration Society*. 2001, 4(1), Str. 101-106. ISSN 1471-3640.

11. Seznam obrázků

Obr. 1 - Schéma sklopného žlabu [1].....	10
Obr. 2 – Schéma jednotlivých snímačů rychlosti [2].....	13
Obr. 3 – Vertikální rychlostní profily.....	14
Obr. 4 – Struktura proudění dvousložkové směsi v režimu horního dna [5].....	15
Obr. 5 – Proložený optimalizovaný profil	16
Obr. 6 – Proložený optimalizovaný profil	17
Obr. 7 – Materiály pevné fáze	19
Obr. 8 – Struktura proudění sedimentu o jedné frakci [10]	23
Obr. 9 – Foto proudění – porovnání proudění částic jedné frakce a dvousložkové směsi	24
Obr. 10 – Možnosti stereoskopického snímání [12]	27
Obr. 11 – Schéma měření pozice promítaného laserového paprsku [13].....	27
Obr. 12 – Záznam proudění	28
Obr. 13 – Barevný model stupně šedi.....	29
Obr. 14 – Příklad typických rozsahů světlosti	29
Obr. 15 – Schéma typického průběhu výpočtu pro jeden snímek	30
Obr. 16 – Výsledná průměrná hodnota poměru hrubé frakce po výšce proudění	31
Obr. 17 – Poloha analyzovaných oken	33
Obr. 18 – Porovnání celkového poměru jemné frakce v levém a středním okně	34
Obr. 19 – Porovnání výsledků levého a pravého okna se středním výpočetním oknem.....	35
Obr. 20 – Šířky analyzovaných oken	36
Obr. 21 – Průběh poměru hrubé frakce po výšce	37
Obr. 22 – Porovnání výsledků pro různé šířky analyzované oblasti	38
Obr. 23 – Schéma změn rozsahu výšky transportní vrstvy.....	40
Obr. 24 – Porovnání výšek transportní vrstvy.....	41
Obr. 25 – Porovnání výsledků pro různé výšky transportní vrstvy	42
Obr. 26 – Rozsahy světlostí všech pokusů.....	44
Obr. 27 – Příklad změn rozsahů světlosti pro citlivostní analýzu	44
Obr. 28 – Výsledky citlivostní analýzy pro změnu rozsahu minimální světlosti hranice bílé částice	46
Obr. 29 – Výsledky citlivostní analýzy pro změnu rozsahu maximální světlosti hranice černé částice	47
Obr. 30 – Relativní rozdíly poměrů jemné frakce v závislosti na Shieldsově čísle	49

Obr. 31 – Porovnání metod měření celkového poměru jemné frakce v transportované směsi	50
Obr. 32 – Porovnání celkových poměrů jemné frakce a jejich absolutních rozdílů.....	51
Obr. 33 – Porovnání vybraných celkových poměrů a jejich relativních rozdílů	52
Obr. 34 – Závislost relativní chyby na střední dopravní koncentraci	54
Obr. 35 – Závislost relativní chyby na celkovém poměru jemné frakce v transportované směsi	54
Obr. 36 – Porovnání absolutních a relativních chyb pro uměle zavedenou chybu vážení vzorku.....	55
Obr. 37 – Porovnání absolutních a relativních chyb vzniklých změnou mezních hodnot světlosti pro vybrané pokusy	58
Obr. 38 – Porovnání absolutních a relativních chyb vzniklých změnou výšky transportní vrstvy pro vybrané pokusy	59
Obr. 39 – Porovnání celkových objemů nepromíchané a promíchané směsi sTK1270	61
Obr. 40 – Typický průběh pórovitosti dvousložkové směsi v závislosti na poměru hrubé frakce	62
Obr. 41 – Typický průběh specifického objemu dvousložkové směsi v závislosti na poměru hrubé frakce	62
Obr. 42 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs sTK1230	67
Obr. 43 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs sTK1270	68
Obr. 44 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs HT	69
Obr. 45 – Porovnání naměřených pórovitostí a specifických objemů s výsledky jednotlivých modelů pro směs HT25	70

12. Seznam tabulek

Tabulka 1 – Základní vlastnosti použitých materiálů	18
Tabulka 2 – Rozsah parametrů proudění	19
Tabulka 3 – Rozsah světlosti pozadí	43
Tabulka 4 – Hodnoty průměrných absolutních rozdílů	56